

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALINY LUCIA BORGES BORBA

FILTROS PERCOLADORES PARA TRATAMENTO DE ESGOTO:  
COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E MATERIAIS  
UTILIZADOS COMO MEIO SUORTE E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS A  
PARTIR DAS EXPERIÊNCIAS OBSERVADAS NO BRASIL E NA ALEMANHA

CURITIBA

2017

ALINY LUCIA BORGES BORBA

FILTROS PERCOLADORES PARA TRATAMENTO DE ESGOTO:  
COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E MATERIAIS  
UTILIZADOS COMO MEIO SUPORTE E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS A  
PARTIR DAS EXPERIÊNCIAS OBSERVADAS NO BRASIL E NA ALEMANHA

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais, no Curso de Pós-graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, Departamento de Engenharia Química, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e com a *Universität Stuttgart*, Alemanha.

Orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karen Juliana do Amaral.

Co-orientadora: Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daniela Neuffer.

CURITIBA

2017

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR  
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

---

B726f      Borba, Aliny Lucia Borges  
Filtros percoladores para tratamento de esgoto: comparação entre métodos de dimensionamento e materiais utilizados como meio suporte e proposição de melhorias a partir das experiências observadas no Brasil e na Alemanha / Aliny Lucia Borges Borba – Curitiba, 2017.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e Industrial, em parceria com o Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial (SENAI) e a Universität Stuttgart. (Alemanha).

Orientadora: Karen Juliana do Amaral.

Coorientadora: Daniela Neuffer.

1. Esgoto - tratamento. 2. Filtros percoladores. 3. Estação de tratamento - projeto. I. Universidade Federal do Paraná. II. Amaral, Karen Juliana do III. Neuffer, Daniela. IV. Título.

CDD: 628.24

---

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
Setor TECNOLOGIA  
Programa de Pós-Graduação MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL

### TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em MEIO AMBIENTE URBANO E INDUSTRIAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **ALINY LUCIA BORGES BORBA** intitulada: **FILTROS PERCOLADORES PARA TRATAMENTO DE ESGOTO: COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DE DIMENSIONAMENTO E MATERIAIS UTILIZADOS COMO MEIO SUPORTE E PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS A PARTIR DAS EXPERIÊNCIAS OBSERVADAS NO BRASIL E NA ALEMANHA**, após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 31 de Outubro de 2017.

KAREN JULIANA DO AMARAL

Presidente da Banca Examinadora (UFPR)

CARLOS AUGUSTO DE LEMOS CHERNICHARO

Avaliador Externo (UFMG)

FLAVIO BENTES FREIRE

Avaliador Externo (UTFPR)

EDUARDO FELGA GOBBI

Avaliador Interno (UFPR)



## AGRADECIMENTOS

Às orientadoras, Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Karen Juliana do Amaral e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Daniela Neuffer, da *Universität Stuttgart*, pela condução e atenção dedicada a este estudo, e às coordenadoras do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e industrial (PPGMAUI) da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Margarete Casagrande Lass Erbe e Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Mônica Beatriz Kolicheski, pela atenção dedicada aos alunos e por somarem esforços para conduzir o PPGMAUI.

Aos componentes da banca examinadora, Prof. Dr. Carlos Augusto de Lemos Chernicharo, da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), Prof. Dr. Eduardo Felga Gobbi, da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Prof. Dr. Flávio Bentes Freire, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e Eng. M.Sc. Luís César Baréa, da Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), por aceitarem prontamente o convite para compor a banca e por enriquecerem o trabalho com contribuições valiosas. Agradeço pelas considerações e enfatizo que foi uma grande honra contar com vocês para analisar tecnicamente esta dissertação. Muito obrigada!

À Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar), ao Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente Urbano e industrial (PPGMAUI), à Universidade Federal do Paraná (UFPR), à *Universität Stuttgart*, ao *Institut für Siedlungswasserbau, Wassergüte-und Abfallwirtschaft* (ISWA) e ao *Deutscher Akademischer Austauschdienst* (DAAD), que tornaram possível o desenvolvimento deste estudo no Brasil e na Alemanha.

Ao Eng. M.Sc. Luís César Baréa, por incentivar o estudo do tema filtros percoladores; ao Eng. M.Sc. Pedro Luís Prado Franco, fundamental por apoiar e incentivar a capacitação e por conceder a liberação para realização de parte do estudo na Alemanha; ao Eng. Dr. Christian-Dominik Henrich e ao Eng. M.Sc. André Gomes, por oferecerem apoio técnico e visitas técnicas durante o período na Alemanha, por meio da *Enexio Service GmbH*; e aos colegas Eng. M.Sc. Eduardo Sabino Pegorini, Eng. M.Sc. César Augusto Marin, Bioq. Vanessa Galperin, Eng. Dr. Leandro Alberto Novak e Eng. Dr. Paulo Gustavo Sertório de Almeida, pelas observações técnicas.

Aos colegas Saneparianos Eng. Dr. Gustavo Rafael Collere Possetti, pela atenção e pela energia que deposita em cada um que está à sua volta; Eng. M.Sc. Edgard Faust Filho, Adv. M.Sc. Rosaldo Jorge de Andrade, Adv. M.Sc. Fernando Massardo,

Adv. M.Sc. Marcus Venício Cavassin, Tecn. Ivone Pasenko Demetrio e Soc. Ruth Aparecida Favorin Martins, pela atenção quanto ao processo de liberação para estudo na Alemanha; e à Diretoria da Sanepar, Adv. M.Sc. Glauco Machado Requião, Diretor de Meio Ambiente e Ação Social, Eng. M.Sc. João Martinho Cleto Reis Jr., Diretor de Investimentos, e Eng. Paulo Alberto Dedavid, Diretor de Operações, por terem me recebido e por permitir que parte deste estudo fosse desenvolvido na Alemanha.

Aos demais amigos Saneparianos, muito respeito e uma sincera gratidão! Quando conversei com cada um de vocês sobre o tema e sobre a intenção de desenvolver um trabalho acadêmico aplicável à Sanepar, enquanto uns apontaram aspectos técnicos e operacionais significativos a serem estudados, enriquecendo o trabalho, outros me ajudaram a ser persistente durante um percurso cheio de obstáculos... Cada um de vocês foi muito importante para mim e eu só tenho a agradecer pelas boas amizades!

Às equipes de operação das ETEs visitadas no Paraná e na Alemanha, por terem me recebido, acompanhado as visitas técnicas e relatado informações importantes. Estabelecer uma conexão entre a teoria e a prática operacional era um grande propósito desse estudo e isso só foi possível com a colaboração de vocês!

À Família e aos grandes Amigos, pela torcida e pela alegria compartilhada de forma verdadeira a cada conquista!

Ao meu melhor amigo, meu amor, Arcílio José Ferreira, por “me dar asas pra voar e motivos pra voltar”, pela cumplicidade e pelo amor simples que temos um com o outro, que me oferece tranquilidade e alegria, independente da distância ou das ausências. Obrigada pela compreensão e pelo entusiasmo de sempre!

À minha mãe, Lucia de Fátima Borges Borba, pelas lições e orações, por todos os momentos compartilhados, por ir comigo “aonde quer que eu vá”...! Ao meu pai, Paulo Moreira Borba, que despertou em mim a busca por uma função social na Engenharia, essa função que hoje desempenho ao trabalhar para o desenvolvimento do saneamento, um tema apaixonante em que a Engenharia é transformada em preservação do meio ambiente e manutenção da saúde pública e do bem-estar social.

***A uma força maior que chamamos “Deus”, por me proporcionar a riqueza do convívio e da amizade com todas essas pessoas especiais à minha volta!***

## RESUMO

O presente estudo disserta sobre a utilização de filtros percoladores para tratamento de esgoto, objetivando a comparação entre métodos de dimensionamento e materiais utilizados como meio suporte e a proposição de melhorias nas etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de estações de tratamento de esgoto com esse processo unitário a partir de experiências em escala operacional observadas no Brasil e na Alemanha. Para tal, foi realizada inicialmente uma primeira etapa teórica composta por simulações de dimensionamento, aplicando diferentes equações e variando os materiais empregados como meio suporte para dois cenários estabelecidos, sendo o primeiro para degradação de matéria orgânica e o segundo para degradação de matéria orgânica e realização de nitrificação, resultando em 12 combinações de dimensionamento. As equações utilizadas foram as apresentadas por literatura internacional e nacional, sendo fontes recentemente revisadas, incluindo Metcalf & Eddy (2016) e Jordão e Pessôa (2014), e por uma recente publicação científica da *Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* (Associação Alemã para Gerenciamento de Água, Águas Residuárias e Resíduos) (DWA, 2016), que propõe a modernização do método de cálculo e de algumas das equações já utilizadas para dimensionamento. Ainda na etapa teórica, foram abordados os principais aspectos que influenciam o adequado funcionamento e operação de um filtro percolador, incluindo os relacionados diretamente aos filtros e os relacionados aos demais processos a montante e a jusante dos filtros. A segunda etapa realizada no estudo foi de caráter prático e apresentou experiências operacionais verificadas em 29 estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores, sendo 26 no Estado do Paraná, sul do Brasil, e 3 nos Estados de *Baden-Württemberg* e de *Bayern*, sul da Alemanha. A abordagem prática apresentou a realidade operacional das estações visitadas, incluindo dificuldades e problemas vivenciados e soluções implementadas, utilizando exemplos práticos observados em campo para discutir acerca dos aspectos que influenciam o bom funcionamento de um filtro percolador, identificados na etapa teórica e confirmados na etapa prática. Objetivando a aplicabilidade do estudo, na terceira etapa as informações teóricas e práticas estudadas, observadas e relatadas ou registradas foram sistematizadas com base no conceito de Matriz *SWOT*. Todos os resultados parciais obtidos foram identificados como pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças, relacionados às etapas de projeto, implantação e operação de filtros percoladores, permeando todos os aspectos discutidos, totalizando mais de 300 itens apontados. A compilação dessas informações permitiu apontar de forma sintetizada as principais ações e os desdobramentos práticos e aplicáveis para cada aspecto discutido. Tanto os itens compilados na Matriz *SWOT* quanto as ações e desdobramentos apontados nessa etapa aplicável do estudo permeiam as etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de ETEs com filtros percoladores, abordando aspectos fundamentais para o bom funcionamento desse processo unitário. Tais produtos são apresentados, então, como propostas para melhoria de estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores visando aprimorar o uso e a aplicação dessa tecnologia, contribuindo para o desenvolvimento do setor de saneamento no Paraná e no Brasil.

**Palavras-chave:** Tratamento de esgoto. Estações de tratamento de esgoto. Filtros Percoladores. Dimensionamento. Projeto. Implantação. Operação. Manutenção. Meio suporte.

## ABSTRACT

The present study deals with the use of trickling filters for wastewater treatment, aiming at the comparison between sizing methods and materials used as support media, and aiming at proposing improvements in the sizing methods, design, implementation, operation and maintenance stages of wastewater treatment with this unit process from experiences observed in operational scale in Brazil and Germany. To do this, a theoretical stage was first made up of design simulations, applying different equations and varying the materials used as support media for two established scenarios, the first for organic matter degradation and the second for organic matter degradation and nitrification, resulting in 12 sizing combinations. The equations used were those presented by international and national literature, being recently revised sources, including Metcalf & Eddy (2016) and Jordão and Pessôa (2014), and by a recent scientific publication of the *Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* (German Association for Water, Wastewater and Waste Management) (DWA, 2016), which proposes a modernization of the sizing method and some of the equations already used for sizing. Also in the theoretical stage, the main aspects that influence the proper functioning and operation of a trickling filter, including those related directly to the filters and those related to the other processes upstream and downstream of the filters were discussed. The second stage of the study was of a practical point of view and presented operational experiences verified in 29 wastewater treatment plants operating trickling filters, 26 in the State of Paraná, southern of Brazil, and 3 in the States of *Baden-Württemberg* and *Bayern*, southern of Germany. The practical approach presented the operational reality of the visited stations, including difficulties and problems experienced as solutions implemented, using practical examples observed to discuss the aspects that influence the proper functioning and operation of a trickling filter, identified in the theoretical stage and confirmed in the practical stage. With the objective of applying the study, in the third stage, the theoretical and practical information studied, observed and reported or recorded were systematized based on the SWOT Matrix concept. All of the partial results were identified as strengths, weaknesses, opportunities and threats related to the design, implementation and operation of trickling filters, permeating all aspects discussed, totaling more than 300 items pointed out. The compilation of this information allowed us to synthesize the main actions and the practical and applicable developments for each aspect discussed. The items compiled in the SWOT Matrix and the actions and developments pointed out in this applicable step of the study permeate through sizing, design, implementation, operation and maintenance stages of WWTPs with trickling filters, addressing fundamental aspects for the proper functioning and operation of this biological process. These products are then presented as proposals for improvement of wastewater treatment plants with trickling filters to improve the use and application of this technology, contributing to the development of the sanitation sector in Paraná and Brazil.

**Key-words:** Wastewater treatment. Wastewater treatment plants. Trickling filters. Design methods. Project. Implementation. Operation. Maintenance. Support media.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Índices de cobertura de esgoto no Brasil .....	27
Figura 2 – Eficiências de remoção de DBO por região, em relação ao número de ETEs e em relação ao número de habitantes .....	28
Figura 3 – Eliminação de DQO, nitrogênio total e fósforo total nas estações de tratamento de esgoto municipais da Alemanha.....	29
Figura 4 – Influência do pH na presença de amônia livre e amônia ionizada .....	34
Figura 5 – Ciclo do nitrogênio.....	36
Figura 6 – Fluxograma simplificado de uma estação de tratamento de esgoto com filtro percolador .....	43
Figura 7 – Princípio de funcionamento da caixa de areia aerada em corte.....	46
Figura 8 – Representação em corte de um reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo.....	48
Figura 9 – Filtro percolador em corte .....	52
Figura 10 – Filtro percolador em corte tridimensional .....	52
Figura 11 – Perfil de oxidação de carbono C e de conversão de nitrogênio amoniacal $\text{NH}_4^+$ em nitrato $\text{NO}_3^-$ ao longo da profundidade de um filtro percolador .....	67
Figura 12 – Concepção de cálculo segmentado proposto pela DWA (2016) .....	67
Figura 13 – Possibilidades de recirculação do efluente do filtro percolador.....	95
Figura 14 – Fluxograma simplificado de uma estação de tratamento de esgoto com lodos ativados .....	103
Figura 15 – Fluxograma resumo do estudo conforme os objetivos específicos .....	112
Figura 16 – Combinações de objetivos de tratamento, métodos de dimensionamento e materiais utilizados como meio suporte e identificação dos filtros percoladores a serem dimensionados .....	114
Figura 17 – Resumo das atividades para atingir o primeiro objetivo específico .....	122
Figura 18 – Resumo das atividades para atingir o objetivo específico prático .....	125
Figura 19 – Itens analisados nas visitas às ETEs .....	129
Figura 20 – Resumo das atividades para atingir o objetivo específico (iii) .....	135
Figura 21 – Curvas de concentração ao longo da altura do meio suporte no filtro percolador FP-CN6 .....	164
Figura 22 – Processos unitários que compõem as ETEs da Sanepar .....	168

Figura 23 – Indicação de municípios que possuem ETEs com filtros percoladores no Paraná.....	169
Figura 24 – Indicação da localização das ETEs visitadas no Sul da Alemanha.....	170
Figura 25 – Sistema de tratamento preliminar composto por duas etapas de gradeamento manual e por uma peneira fina rotativa mecanizada.....	172
Figura 26 – Sistema de tratamento preliminar em fase final de obra composto por gradeamento manual, peneira fina rotativa mecanizada e grade fina.....	173
Figura 27 – Detalhe das caçambas que armazenam os resíduos provenientes do gradeamento .....	174
Figura 28 – Fechamento do sistema de tratamento preliminar em diversas ETEs no Paraná.....	175
Figura 29 – Gradeamento e caçamba de resíduos sólidos instalados em galpão fechado .....	176
Figura 30 – Gradeamento e caçamba de resíduos sólidos instalados em galpão fechado .....	176
Figura 31 – Sistema de tratamento preliminar com gradeamento, desarenador, sistema de lavagem de areia caçambas instalados em galpão fechado.....	177
Figura 32 – Sistema de tratamento preliminar com gradeamento, desarenador, sistema de lavagem de areia caçambas instalados em galpão fechado.....	177
Figura 33 – Caixa de areia aerada com sistema de ponte rolante hidráulica.....	179
Figura 34 – Decantadores primários nas ETEs visitadas no Sul da Alemanha.....	181
Figura 35 – Pontos de acesso para coleta de espuma nos reatores anaeróbios ....	183
Figura 36 – Filtro percolador com meio suporte em pedra brita.....	185
Figura 37 – Filtro percolador com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado .....	186
Figura 38 – Filtro percolador com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado .....	186
Figura 39 – Vista parcial da superfície do filtro percolador e detalhe do biofilme aderido ao meio suporte em pedra lava .....	186
Figura 40 – Vista parcial da superfície de um dos filtros percoladores e detalhes do biofilme aderido aos meios suportes plásticos .....	187
Figura 41 – Meio suporte plástico estruturado danificado ao longo do tempo .....	189
Figura 42 – Meio suporte em pedra brita exige laje de drenagem com função estrutural .....	194

Figura 43 – Detalhes de projeto da laje de drenagem com placas pré-moldadas perfuradas .....	194
Figura 44 – Meio suporte plástico apoiado em blocos de concreto, dispensa o uso de laje perfurada .....	195
Figura 45 – Paredes laterais em material pré-fabricado e leve (painéis de aço, PRFV ou outros) .....	195
Figura 46 – Sistema de distribuição parado, braços distribuidores em PRFV desnivelados e deformados e meio suporte subutilizado .....	198
Figura 47 – Sistema de distribuição em aço inox AISI 304 com sinais de corrosão e vazamento.....	198
Figura 48 – Sistema de distribuição em aço inox AISI 316 .....	200
Figura 49 – Sistema de distribuição em CPVC .....	200
Figura 50 – Diferentes configurações de sistemas de distribuição.....	201
Figura 51 – Braços com chapa difusora acoplada para uniformizar a distribuição de vazão.....	202
Figura 52 – Registro com chapa difusora individual acoplada .....	202
Figura 53 – Orifícios obstruídos ou entupidos devido à presença de sólidos e gorduras acumulados .....	203
Figura 54 – Acesso para limpeza na extremidade do braço de distribuição .....	204
Figura 55 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	205
Figura 56 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	205
Figura 57 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	206
Figura 58 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	206
Figura 59 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	206
Figura 60 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão.....	207
Figura 61 – Representação da superfície de um filtro percolador de raio igual a 10,0 m segmentado de metro a metro para simulação de área equivalente alimentada por segmento de raio.....	208

Figura 62 – Orifícios e registros posicionados no sentido contrário à rotação do sistema.....	210
Figura 63 – Sistema de distribuição com motor .....	211
Figura 64 – Distribuição irregular no filtro percolador .....	212
Figura 65 – Sistema de distribuição desnivelado e alimentação parcial do filtro.....	213
Figura 66 – Falhas na formação do biofilme .....	214
Figura 67 – Sistema de distribuição estático com canaletas vertedoras .....	215
Figura 68 – Exemplo de distribuidor estático.....	217
Figura 69 – Aspecto do biofilme aderido ao meio suporte plástico estruturado no Paraná.....	221
Figura 70 – Aspecto do biofilme aderido ao meio suporte em pedra brita no Paraná .....	222
Figura 71 – Exemplo de meio suporte em pedra brita parcialmente colmatado.....	225
Figura 72 – Aspecto visual de um dos filtros percoladores antes, durante e depois da troca do meio suporte de pedra brita para meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado .....	226
Figura 73 – Paredes duplas nos filtros percoladores .....	229
Figura 74 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno .....	230
Figura 75 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno .....	230
Figura 76 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno .....	231
Figura 77 – Tubulação de extravasamento (projeto e situação real com vazão excedente).....	237
Figura 78 – Caixa divisora de fluxo e filtro biológico para tratamento de gases.....	239
Figura 79 – Aeração na caixa divisora de fluxo e detalhes da tampa de vedação .....	239
Figura 80 - Caixa divisora de fluxo e filtro biológico para tratamento de gases .....	239
Figura 81 – Detalhe da aeração na caixa divisora de fluxo .....	240



Figura 82 – Cascadeamento para desprendimento de gases na caixa divisora de fluxo e sistema de captação e tratamento de gases .....	240
Figura 83 – Caramujos retirados dos filtros percoladores com meio suporte plástico .....	242
Figura 84 – Vista aérea e vista parcial da ETE <i>Kempton</i> .....	247
Figura 85 – Vista parcial da superfície do filtro percolador.....	247
Figura 86 – Vista aérea e vista parcial da ETE <i>Sindelfingen</i> .....	249
Figura 87 – Tanques para reação <i>Anammox</i> , filtros de areia e reservatório de carvão ativado.....	250
Figura 88 – Vista aérea e vista parcial da ETE <i>Neuhausen</i> .....	252
Figura 89 – Matéria do Jornal digital de <i>Stuttgart</i> tem como título “Diferença extrema de preços entre municípios”, ilustrando diferença de tarifa de água entre municípios da mesma região.....	257

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Formas predominantes de nitrogênio conforme o meio .....	33
Quadro 2 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a degradação de carbono .....	72
Quadro 3 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a conversão de nitrogênio.....	74
Quadro 4 – Principais vantagens e desvantagens por tipo de sistema de lodos ativados.....	103
Quadro 5 – Comparação entre filtros percoladores de baixa taxa e sistema de lodos ativados SBR com aeração prolongada .....	106
Quadro 6 – Esboço da Matriz <i>SWOT</i> adaptada, elaborada para análise dos aspectos discutidos .....	133
Quadro 7 – Correlações estabelecidas a partir da análise cruzada da Matriz <i>SWOT</i> .....	134
Quadro 8 – Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf & Eddy para o cenário “C”.....	138
Quadro 9 – Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário “C” .....	142
Quadro 10 – Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário “C” .....	146
Quadro 11 – Resultados obtidos a partir das equações propostas por Metcalf & Eddy para o cenário “CN” .....	153
Quadro 12 – Resultados obtidos a partir das equações propostas por Jordão e Pessoa para o cenário “CN” .....	157
Quadro 13 – Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário “CN” .....	161
Quadro 14 – Relação de ETEs analisadas e visitadas no Sul da Alemanha .....	169
Quadro 15 – Ações e desdobramentos relacionados à escolha de filtros percoladores.....	265
Quadro 16 – Ações e desdobramentos relacionados à retenção de sólidos grosseiros.....	271
Quadro 17 – Ações e desdobramentos relacionados à retenção de areia e gordura.....	275

Quadro 18 – Ações e desdobramentos relacionados aos métodos de dimensionamento .....	279
Quadro 19 – Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita .....	284
Quadro 20 – Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte plástico estruturado .....	291
Quadro 21 – Ações e desdobramentos relacionados ao sistema de distribuição afluente ao filtro.....	296
Quadro 22 – Ações e desdobramentos relacionados à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica .....	299
Quadro 23 – Ações e desdobramentos relacionados ao desenvolvimento do biofilme.....	303
Quadro 24 – Ações e desdobramentos relacionados à lavagem do meio suporte e controle do crescimento do biofilme .....	307
Quadro 25 – Ações e desdobramentos relacionados à colmatção e à substituição do meio suporte.....	311
Quadro 26 – Ações e desdobramentos relacionados à eficiência de molhamento do meio suporte.....	314
Quadro 27 – Ações e desdobramentos relacionados à aeração natural e arraste de ar .....	319
Quadro 28 – Ações e desdobramentos relacionados à recirculação do efluente....	322
Quadro 29 – Ações e desdobramentos relacionados à nitrificação.....	324
Quadro 30 – Ações e desdobramentos relacionados ao sistema de controle de picos de vazão.....	327
Quadro 31 – Ações e desdobramentos relacionados a odores e gases corrosivos .....	331

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características do esgoto doméstico bruto .....	30
Tabela 2 – Limites de lançamento aplicáveis às estações de tratamento de esgoto estabelecidos pelo CONAMA em nível nacional e pela SEMA-PR em nível estadual.....	39
Tabela 3 – Limites de lançamento estabelecidos de acordo com classes de carga afluyente nas ETEs .....	40
Tabela 4 – Parâmetros para projeto de decantador primário seguido de tratamento secundário.....	46
Tabela 5 – Parâmetros para projeto de decantador primário com retorno de excesso de lodo ativado .....	47
Tabela 6 – Parâmetros de projeto e taxas de operação para filtros percoladores ....	77
Tabela 7 – Critérios de dimensionamento para filtros percoladores de alta taxa empregados após reatores anaeróbios.....	78
Tabela 8 – Propriedades físicas dos materiais utilizados como meio suporte para filtros percoladores.....	81
Tabela 9 – Fatores de correção para cálculo de perda de carga em diferentes materiais utilizados como meio suporte .....	84
Tabela 10 – Valores recomendados para taxas de dosagem para operação normal e para lavagem.....	87
Tabela 11 – Fator de influência $\vartheta_1$ relacionado à altura do meio suporte.....	88
Tabela 12 – Fator de influência $\vartheta_2$ relacionado à carga de DQO aplicada .....	88
Tabela 13 – Fator de influência $\vartheta_3$ relacionado ao material e tipo do meio suporte .....	88
Tabela 14 – Razão e fator de recirculação.....	94
Tabela 15 – Taxa de aplicação hidráulica para decantador secundário após filtro percolador .....	101
Tabela 16 – Parâmetros para comparação entre filtros percoladores e lodos ativados.....	106
Tabela 17 – Estimativas de <i>Capex</i> e <i>Opex</i> para filtros percoladores e lodos ativados.....	109
Tabela 18 – Estimativas de <i>Capex</i> e <i>Opex</i> para filtros percoladores e lodos ativados.....	109



Tabela 19 – Definição da qualidade do efluente final para os cenários “C” e “CN” .....	115
Tabela 20 – Caracterização do afluente ao filtro percolador .....	117
Tabela 21 – Definição dos valores médios para taxa de aplicação hidráulica e para carga orgânica volumétrica a partir das faixas de valores sugeridos pela literatura	120
Tabela 22 – Variáveis de projeto e de operação adotadas .....	121
Tabela 23 – Simulação de área equivalente alimentada para cada segmento do braço de distribuição .....	208
Tabela 24 – Estimativa de ganho efetivo de área superficial específica entre a pedra brita e o plástico randômico (não estruturado) .....	227
Tabela 25 – Dados de afluente e efluente dos filtros percoladores da ETE <i>Kempten</i> .....	246
Tabela 26 – Dados de afluente e efluente da ETE <i>Sindefingen</i> .....	250
Tabela 27 – Dados de afluente e efluente da ETE <i>Neuhausen</i> .....	252

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>22</b>
1.1	JUSTIFICATIVA.....	24
1.2	OBJETIVOS DO ESTUDO .....	25
1.2.1	Objetivo Geral.....	25
1.2.2	Objetivos Específicos .....	26
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>27</b>
2.1	ESTATÍSTICAS DE SANEAMENTO NO BRASIL E NA ALEMANHA .....	27
2.1.1	Índices de coleta e tratamento de esgoto no Brasil .....	27
2.1.2	Índices de coleta e tratamento de esgoto na Alemanha .....	28
2.2	COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO DOMÉSTICO.....	29
2.2.1	Composição do esgoto doméstico.....	29
2.2.2	Características físicas e químicas que influenciam os processos de tratamento de esgoto.....	37
2.3	QUALIDADE DO EFLUENTE TRATADO PARA LANÇAMENTO EM CORPOS HÍDRICOS.....	38
2.3.1	Exigências legais quanto à qualidade do efluente tratado no Brasil e no Paraná.....	38
2.3.2	Exigências legais quanto à qualidade do efluente final na Alemanha .....	40
2.4	PROCESSOS UNITÁRIOS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO.....	41
2.5	PROCESSOS UNITÁRIOS QUE COMPÕEM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM FILTROS PERCOLADORES .....	42
2.5.1	Processos unitários a montante do filtro percolador .....	43
2.5.2	Filtros percoladores .....	51
2.5.3	Processos unitários a jusante do filtro percolador .....	100
2.5.4	Comparações entre filtros percoladores e lodos ativados .....	105
2.6	SWOT - FERRAMENTA DE GESTÃO E PLANEJAMENTO .....	109
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>112</b>
3.1	DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA AVALIAR COMPARATIVAMENTE OS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES .....	113
3.1.1	Definições quanto aos objetivos de tratamento dos filtros percoladores ....	115
3.1.2	Definições quanto à composição da ETE.....	116

3.1.3	Definições quanto à caracterização do esgoto afluente ao filtro percolador .....	116
3.1.4	Definições quanto aos métodos de dimensionamento .....	117
3.1.5	Definições quanto aos materiais a serem utilizados como meio suporte....	118
3.1.6	Definição das taxas de aplicação hidráulica e das cargas orgânicas volumétricas .....	119
3.1.7	Resumo da caracterização do esgoto e das variáveis adotadas para simulação de dimensionamento .....	121
3.1.8	Sequência de atividades para simulação de dimensionamento .....	122
3.2	DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA ANALISAR CRITICAMENTE ASPECTOS RELACIONADOS ÀS ETAPAS DE PROJETO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO EM ETES COM FILTROS PERCOLADORES NO BRASIL E NA ALEMANHA.....	123
3.2.1	Levantamento de leis e resoluções aplicáveis no Brasil, no Paraná e na Alemanha .....	125
3.2.2	Descrição de aspectos locais do Brasil e da Alemanha .....	125
3.2.3	Levantamento e definição de ETES a analisar no Brasil e na Alemanha e verificação das práticas de operação e manutenção realizadas .....	127
3.2.4	Descrição das ETES analisadas, das práticas e das experiências de operação .....	128
3.2.5	Análise crítica das situações verificadas nas ETES e das características que definem as diferentes realidades em que estão inseridas.....	132
3.3	DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA ORGANIZAR SISTEMATICAMENTE INFORMAÇÕES E RESULTADOS PARA SUBSIDIAR AÇÕES PARA MELHORIAS.....	132
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>136</b>
4.1	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES .....	136
4.1.1	Resultados de dimensionamento de filtros percoladores para degradação da matéria orgânica e considerações.....	137
4.1.2	Resultados de dimensionamento de filtros percoladores para degradação de matéria orgânica e conversão de nitrogênio e considerações.....	152

4.2	ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL E LEVANTAMENTO DOS PROCESSOS UNITÁRIOS UTILIZADOS NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO PARANÁ.....	167
4.2.1	Processos unitários empregados nas ETEs no Paraná e considerações sobre a aplicabilidade do estudo para a Sanepar .....	167
4.3	RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO ANALISADAS NO PARANÁ E NO SUL DA ALEMANHA.....	169
4.3.1	Estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores analisadas no Paraná.....	169
4.3.2	Estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores analisadas na Alemanha .....	169
4.4	DESCRIPTIVO DAS ETES COM FILTROS PERCOLADORES ANALISADAS NO PARANÁ E NA ALEMANHA .....	170
4.4.1	Processos unitários empregados a montante do filtro percolador nas ETEs visitadas .....	171
4.4.2	Filtros percoladores .....	184
4.4.3	Processos unitários a jusante do filtro percolador .....	242
4.5	RESUMO DOS PRINCIPAIS DADOS E CARACTERÍSTICAS DAS ETES ANALISADAS E VISITADAS.....	244
4.5.1	ETEs no Paraná .....	244
4.5.2	ETEs no Sul da Alemanha.....	244
4.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE AS EXPERIÊNCIAS OBSERVADAS NAS ETES VISITADAS NO BRASIL E NA ALEMANHA.....	253
4.6.1	Diferentes características do esgoto afluyente.....	253
4.6.2	Processos unitários e tecnologias de tratamento de esgoto utilizadas.....	253
4.6.3	Qualidade do efluente final, eficiências obtidas e a relação com as exigências legais e ambientais.....	254
4.6.4	Estrutura organizacional de empresas prestadoras de serviço de coleta e tratamento de esgoto no Paraná e na Alemanha .....	255
4.7	ANÁLISE SWOT E INDICAÇÃO DE AÇÕES PARA MELHORIAS .....	258
4.7.1	Quanto à escolha de filtros percoladores para compor os processos de uma estação de tratamento de esgoto .....	259
4.7.2	Quanto à retenção de sólidos grosseiros .....	266
4.7.3	Quanto à retenção de areia e gordura.....	271



4.7.4	Quanto aos métodos de dimensionamento de filtros percoladores .....	276
4.7.5	Quanto ao meio suporte em pedra brita .....	279
4.7.6	Quanto ao meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado .....	285
4.7.7	Quanto ao sistema de distribuição de vazão afluente ao filtro .....	292
4.7.8	Quanto à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica .....	296
4.7.9	Quanto ao desenvolvimento do biofilme .....	299
4.7.10	Quanto à lavagem do meio suporte e controle do crescimento do biofilme .....	304
4.7.11	Quanto à colmatção e substituição do meio suporte .....	307
4.7.12	Quanto à eficiência de molhamento do meio suporte .....	311
4.7.13	Quanto à aeração natural e arraste de ar .....	315
4.7.14	Quanto à recirculação do efluente .....	319
4.7.15	Quanto à nitrificação .....	322
4.7.16	Quanto ao sistema de controle de picos de vazão afluente ao filtro percolador .....	325
4.7.17	Quanto a odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador .....	328
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>332</b>
5.1	AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES UTILIZANDO DIFERENTES EQUAÇÕES E DIFERENTES MATERIAIS COMO MEIO SUPORTE .....	332
5.2	APRESENTAÇÃO DE CONTEXTOS, ASPECTOS LOCAIS E EXPERIÊNCIAS DE OPERAÇÃO VERIFICADAS NO PARANÁ E NO SUL DA ALEMANHA E ANÁLISE CRÍTICA DOS PRINCIPAIS ASPECTOS PARA O BOM FUNCIONAMENTO DE UM FILTRO PERCOLADOR .....	333
5.3	SISTEMATIZAÇÃO DAS INFORMAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES OBTIDOS PARA SUBSIDIAR AÇÕES PARA MELHORIAS EM ETES COM FILTROS PERCOLADORES .....	335
5.4	ATENDIMENTO AO OBJETIVO GERAL PROPOSTO .....	336
5.5	SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS .....	337
5.6	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	340
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>342</b>
	<b>APÊNDICES .....</b>	<b>350</b>
	<b>APÊNDICE A – ÍNDICE PRÁTICO PARA BUSCA RÁPIDA DOS ASPECTOS DISCUTIDOS REFERENTES AOS FILTROS PERCOLADORES .....</b>	<b>351</b>

<b>APÊNDICE B – QUADRO RESUMO COM AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DAS ETES COM FILTROS PERCOLADORES ANALISADAS NO PARANÁ.....</b>	<b>357</b>
<b>APÊNDICE C – MATRIZ <i>SWOT</i> .....</b>	<b>359</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O saneamento básico é definido pela Lei nº. 11.445/2007, “Lei do Saneamento”, como o conjunto de serviços, infraestrutura e instalações operacionais necessárias para promover o abastecimento de água potável, o esgotamento sanitário, a limpeza urbana, o manejo de resíduos sólidos e a drenagem e manejo de águas pluviais (BRASIL, 2007).

As estatísticas sobre saneamento no Brasil são apresentadas periodicamente pelo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS), pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), pelo Instituto Trata Brasil, entre outros.

Os números apresentados indicam que entre 50 e 60 % da população brasileira não tem acesso à rede coletora de esgoto e que cerca de 40 % do esgoto gerado recebe algum tipo de tratamento no Brasil. Tais números sugerem uma significativa demanda de implantação de novos sistemas e novas estações de tratamento de esgoto, bem como ampliações e modernizações dos sistemas existentes, objetivando o aumento do índice de atendimento da população com coleta de esgoto, bem como a melhoria dos processos de tratamento, da qualidade do efluente tratado e das condições de saneamento básico, visando à universalização do saneamento, à preservação dos recursos hídricos, o meio ambiente natural e urbano e à manutenção da saúde pública no Brasil.

Atualmente no Estado do Paraná, para o tratamento de esgoto doméstico em escala municipal, utiliza-se predominantemente reatores anaeróbios, seguidos ou não de outros processos complementares. Em condições normais de operação e manutenção, os reatores anaeróbios apresentam eficiência de 40 a 75 % para remoção da matéria orgânica em termos de demanda química de oxigênio (DQO) e de 45 a 85 % em termos de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Os limites de lançamento estabelecidos pelas outorgas definem a necessidade de implantação de processos unitários complementares para tratamento visando à melhoria da qualidade do efluente final, uma vez que o abatimento de carga orgânica realizado pelos reatores anaeróbios normalmente não é suficiente para atender aos limites de lançamento exigidos para uma estação de tratamento de esgoto (ETE).

Além dos limites de lançamento que determinam a qualidade do efluente final exigida pelos órgãos ambientais, a escolha entre um ou outro processo unitário de tratamento para compor uma ETE considera ainda fatores como área disponível para implantação, complexidade do processo, custos estimados para implantação, operação e manutenção, incluindo consumo energético, demanda de insumos e mão de obra especializada, entre outras variáveis.

Há inúmeros processos unitários anaeróbios e aeróbios que podem ser empregados de forma a complementar o tratamento realizado pelos reatores anaeróbios. Dentre os processos unitários de tratamento mais utilizados no Brasil e no Paraná, pode-se citar diferentes tipos de lagoas, anaeróbias, aeróbias, facultativas, de polimento, entre outras; filtros biológicos anaeróbios, percoladores ou aerados submersos; sistema de lodos ativados convencional, de aeração prolongada ou sequencial em batelada, entre outras configurações.

Outros processos mais avançados como filtros de areia, filtros de carvão ativado granular ou em pó, filtração por membranas, processo *Anammox* (*anaerobic ammonium oxidation* ou oxidação anaeróbia de amônio), entre outros processos físicos, biológicos e químicos podem ser adotados para complementar uma estação de tratamento de esgoto e elevar ainda mais a qualidade do efluente tratado.

Dentre os processos supracitados, os filtros percoladores utilizam o princípio da atuação de micro-organismos aderidos a um meio suporte fixo para o tratamento de esgoto doméstico e industrial, conceito este já utilizado há mais de cem anos, inicialmente em configurações mais rudimentares. O tratamento biológico ocorre quando o esgoto entra em contato com o biofilme aderido ao meio suporte.

Os filtros percoladores são concebidos em uma estrutura composta por tubulações de entrada e saída, sistema de distribuição do afluente e meio suporte de pedra brita ou seixo rolado ou outros materiais plásticos, randômicos ou estruturados, com biofilme aderido, através do qual percola o esgoto distribuído. A atividade biológica é predominantemente aeróbia, sendo a aeração realizada de forma natural, a partir do fluxo de ar estabelecido entre a parte interna e externa do filtro percolador.

O processo de tratamento oferece redução da matéria orgânica e de conversão de nitrogênio em diferentes níveis de eficiência, dependendo das condições do afluente, do dimensionamento e do meio suporte adotados, entre outras variáveis (METCALF & EDDY, 2016; JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Considerando a demanda de implantar processos unitários para complementar estações de tratamento de esgoto com reatores anaeróbios, e considerando que os filtros percoladores são interessantes quanto à qualidade do tratamento, ao baixo consumo de energia, entre outros, os principais aspectos para o bom funcionamento de filtros percoladores, relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, são explorados no presente estudo.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Considerando a atual demanda de melhorias e ampliações em estações de tratamento de esgoto existentes, bem como a necessidade de implantar novas ETEs para aumentar o índice de atendimento de esgotamento sanitário à população, este estudo disserta sobre a utilização de filtros percoladores como um processo unitário utilizado para remoção de matéria orgânica e conversão de nitrogênio amoniacal, abordando conceitos teóricos e experiências práticas atuais acerca do tema.

Os conceitos e as práticas que englobam a utilização de filtros percoladores para o tratamento de esgoto permeiam aspectos diversos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de uma estação de tratamento com filtros percoladores.

Nas etapas de concepção, dimensionamento e projeto, a escolha da tecnologia de tratamento, do método de dimensionamento e dos materiais e equipamentos utilizados subsidiam o dimensionamento e o detalhamento do projeto.

Quando é realizado o dimensionamento preliminar, no estudo de concepção, o valor de uma variável utilizada pode ser arbitrado ou o método de dimensionamento utilizado pode não ser o mais adequado para a situação em análise, fatos estes que diminuem a precisão dos cálculos e podem gerar retrabalhos quando da elaboração do projeto de engenharia.

As estimativas de custos de implantação, operação e manutenção devem subsidiar a escolha da alternativa de tratamento a ser adotada. Essas estimativas podem apresentar alto grau de incerteza em função da atribuição de valores e de taxas teóricas para as diferentes variáveis que definem a eficiência dos processos.

A etapa de concepção demanda, portanto, um nível de detalhamento tal que possibilite manter no projeto de engenharia as definições atribuídas na etapa de

concepção, eliminando ou reduzindo possíveis alterações na etapa de detalhamento do projeto, de forma a manter válido o dimensionamento calculado na etapa de concepção, sem impactar os estudos de viabilidade previamente realizados.

Na fase de implantação, as variáveis podem estar relacionadas aos métodos construtivos, à escolha de alternativas, de materiais e de equipamentos que representem economia na fase de obra, ao fornecimento e à aprovação dos materiais e equipamentos adequados, conforme especificado em projeto, entre outros.

Os aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto e implantação refletem diretamente na operação e na manutenção da ETE e dos filtros percoladores, influenciando a qualidade do efluente final e, conseqüentemente, o impacto socioambiental que uma estação de tratamento representa.

Ao verificar dificuldades e questionamentos relacionados a tais aspectos e etapas, a elaboração do presente estudo é justificada pela necessidade de avaliar os métodos, equações, critérios e parâmetros de dimensionamento atualmente praticados no Brasil e no cenário internacional, analisar os principais aspectos que influenciam o bom funcionamento de um filtro percolador, considerando as afirmações de literatura e as experiências práticas, e, por fim, compilar as observações, resultados e discussões obtidos para subsidiar melhorias em ETEs com filtros percoladores.

O bom funcionamento de um processo de tratamento de esgoto só é obtido com a aplicação da teoria a partir da verificação do que ocorre na prática e essa combinação de experiências é que converge para um cenário de saneamento adequado, saúde e bem-estar social e preservação dos recursos hídricos e do meio ambiente.

## 1.2 OBJETIVOS DO ESTUDO

### 1.2.1 Objetivo Geral

Definiu-se como objetivo geral para este estudo a proposição de melhorias para estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores, contemplando aspectos teóricos e práticos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, considerando variações quanto aos



métodos de dimensionamento e quanto aos materiais utilizados como meio suporte, bem como considerando diferentes experiências observadas no Brasil e na Alemanha.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

A fim de somar conceitos teóricos e experiências práticas para subsidiar as discussões e atingir o objetivo geral proposto, os objetivos específicos foram definidos de tal forma que o primeiro aborda aspectos teóricos, o segundo contempla experiências práticas observadas no Brasil e na Alemanha, e o terceiro soma e consolida os resultados teóricos e práticos de forma aplicável.

#### Objetivo específico (i):

Avaliar comparativamente os resultados de dimensionamento de filtros percoladores utilizando diferentes métodos, equações e sequências de cálculo e empregando diferentes materiais utilizados como meio suporte.

#### Objetivo específico (ii):

Analisar criticamente os principais aspectos para o bom funcionamento de um filtro percolador relacionados às etapas de concepção, projeto, implantação, operação e manutenção de estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores no Brasil e na Alemanha.

#### Objetivo específico (iii):

Utilizar uma ferramenta de gestão e planejamento estratégico de forma a organizar sistematicamente as informações obtidas e os resultados e as discussões apresentadas para subsidiar ações para melhorias em estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 ESTATÍSTICAS DE SANEAMENTO NO BRASIL E NA ALEMANHA

#### 2.1.1 Índices de coleta e tratamento de esgoto no Brasil

O Atlas de Esgoto elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA) apresenta os índices de cobertura em termos de coleta e tratamento de esgoto nas áreas urbanas e estima um alcance de 61,4 % da população brasileira, conforme representado na Figura 1 (ANA, 2017).

Figura 1 – Índices de cobertura de esgoto no Brasil

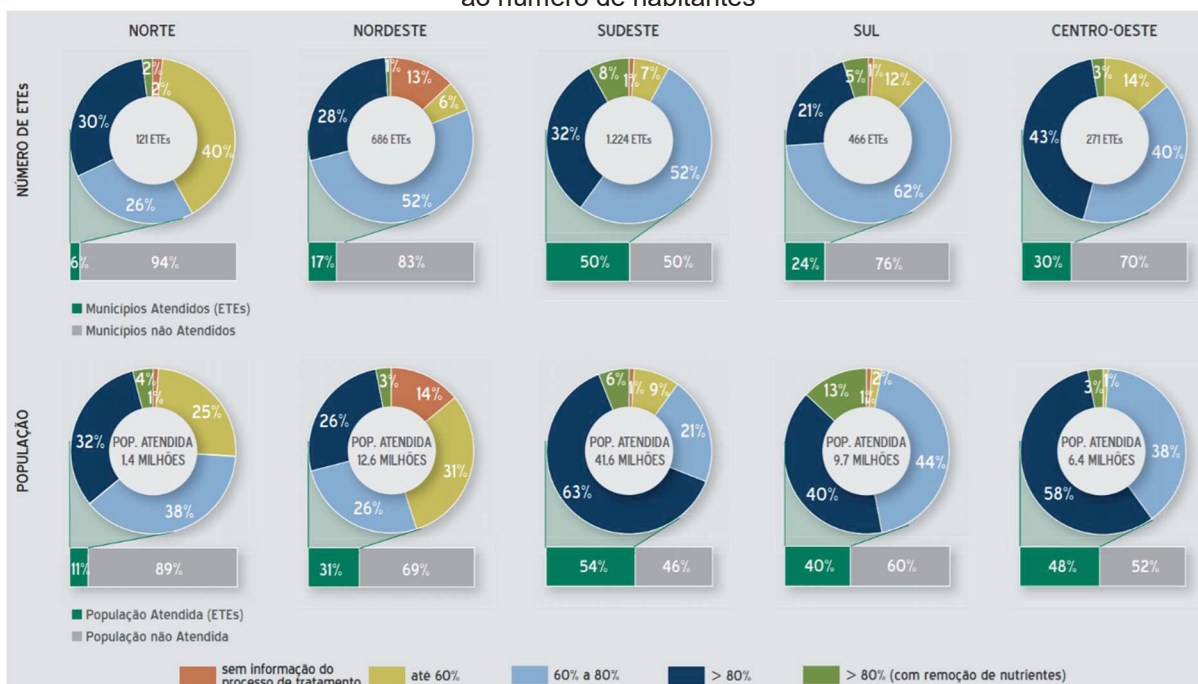


FONTE: ANA (2017).

A ANA complementa que 43 % da população é atendida com sistema coletivo, 12 % por solução individual, 18 % se enquadra na situação em que o esgoto é coletado, porém não é tratado, e, 27 % é desprovida de qualquer tipo de atendimento sanitário. De acordo com os levantamentos realizados, cerca de 65,1 milhões de pessoas não possuem acesso a qualquer sistema de coleta e afastamento de esgoto (ANA, 2017).

De toda a carga orgânica gerada no Brasil, 9,1 mil toneladas de DBO por dia, apenas 39 % é removida com a infraestrutura de tratamento de esgoto existente, resultando em cerca de 5,5 mil toneladas de DBO lançadas diariamente em corpos receptores ou lençóis freáticos (ANA, 2017). O Atlas de Esgoto elaborado pela ANA apresenta as eficiências de remoção de DBO por região geográfica, conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Eficiências de remoção de DBO por região, em relação ao número de ETEs e em relação ao número de habitantes



FONTE: ANA (2017).

Já o Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2017), alimentado a partir das informações fornecidas pelas companhias de saneamento, apresenta os índices de esgotamento sanitário do Brasil referentes a 2015, indicando que 50,3 % da população brasileira é atendida com rede de coleta de esgoto, porém apenas 42,7 % do volume total de esgoto gerado é encaminhado para “algum” processo de tratamento antes de ser lançado em corpos hídricos ou infiltrado no solo.

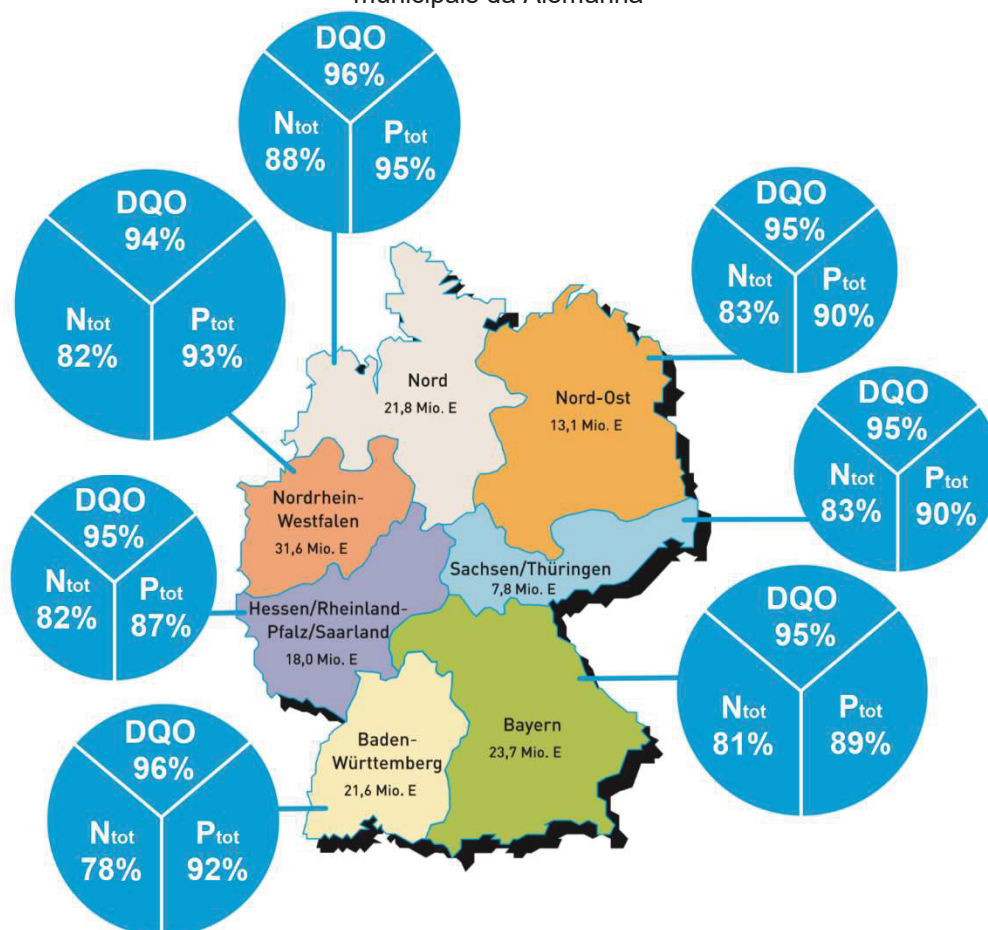
Os índices de esgotamento sanitário do Estado do Paraná apresentados pelo SNIS (2017) indicam que há rede de coleta de esgoto disponível para 68,0 % da população e que de todo o esgoto gerado, 67,7 % recebe “algum” tipo de tratamento.

### 2.1.2 Índices de coleta e tratamento de esgoto na Alemanha

Na Alemanha, dados de 2010 indicaram que 78,1 milhões de habitantes estavam ligados à rede coletora e a estações de tratamento de esgoto, representando 95,6 % da população. No referido ano, as 9.632 ETEs em operação na Alemanha receberam e trataram com altos níveis de degradação de matéria orgânica e remoção de nitrogênio e fósforo cerca de 9.990 milhões de metros cúbicos de esgoto (DWA, 2015). Dados de 2017 apontam médias nacionais de 95, 83 e 92 % de eficiência de remoção de DQO, nitrogênio total e fósforo total, respectivamente (DWA, 2017).

Na Figura 3 é possível verificar as eficiências médias quanto à remoção de DQO, nitrogênio total e fósforo total obtidas pelas ETEs da Alemanha, agrupadas por estado ou regiões, sendo que os valores percentuais estão relacionados ao número de habitantes de cada estado ou região (DWA, 2016).

Figura 3 – Eliminação de DQO, nitrogênio total e fósforo total nas estações de tratamento de esgoto municipais da Alemanha



FONTE: Adaptado de DWA (2017).

**Nota:** As estatísticas foram elaboradas com a participação das Associações Estaduais da DWA.

## 2.2 COMPOSIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DO ESGOTO DOMÉSTICO

### 2.2.1 Composição do esgoto doméstico

O esgoto doméstico é composto por componentes orgânicos, inorgânicos e micro-organismos. Dentre os principais poluentes provenientes de esgoto doméstico, cita-se os sólidos suspensos e os sólidos orgânicos dissolvidos, a matéria orgânica biodegradável, os nutrientes, os patógenos, a matéria orgânica não biodegradável e

outros elementos específicos como metais pesados e micro poluentes (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Para cada parâmetro avaliado, a literatura definiu faixas de concentração e atribuiu concentrações típicas de um esgoto predominantemente doméstico. Os valores para os principais parâmetros segundo Von Sperling e Chernicharo (2005) são apresentados na Tabela 1 em termos de contribuição per capita e concentração do esgoto bruto.

Tabela 1 – Características do esgoto doméstico bruto

Parâmetros	Contribuição per capita (mg/l)		Concentração (mg/l)	
	Faixa	Típico	Faixa	Típico
<b>SÓLIDOS</b>				
<b>Totais</b>	<b>120 - 220</b>	<b>180</b>	<b>700 - 1350</b>	<b>1100</b>
<b>Em suspensão</b>	<b>35 - 70</b>	<b>60</b>	<b>200 - 450</b>	<b>350</b>
Fixos	7 - 14	10	40 - 100	80
Voláteis	25 - 60	50	165 - 350	320
<b>Dissolvidos</b>	<b>85 - 150</b>	<b>120</b>	<b>500 - 900</b>	<b>700</b>
Fixos	50 - 90	70	300 - 550	400
Voláteis	35 - 60	50	200 - 350	300
<b>Sedimentáveis</b>	<b>-</b>	<b>-</b>	<b>10 - 20</b>	<b>15</b>
<b>MATÉRIA ORGÂNICA</b>				
DBO	40 - 60	50	250 - 400	300
DQO	80 - 120	100	450 - 800	600
DBO última	60 - 90	75	350 - 600	450
<b>NITROGÊNIO</b>				
Nitrogênio total NTK	6,0 - 10,0	8	35 - 60	45
Nitrogênio orgânico	2,5 - 4,0	3,5	15 - 25	20
Nitrogênio amoniacal NH <sub>3</sub>	3,5 - 6,0	4,5	20 - 35	25
Nitrito NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	~0,0	~0,0	~0,0	~0,0
Nitrato NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,0 - 0,2	~0,0	0 - 1	~0,0
<b>FÓSFORO</b>				
Fósforo total	0,7 - 2,5	1	4 - 15	7
Fósforo orgânico	0,2 - 1,0	0,3	1 - 6	2
Fósforo inorgânico	0,5 - 1,5	0,7	3 - 9	5
pH	-	-	6,7 - 8,0	7
Alcalinidade (CaCO <sub>3</sub> )	20 - 40	30	100 - 250	200
<b>ELEMENTOS ESPECÍFICOS</b>				
Metais pesados	~0	~0	traços	traços
Compostos orgânicos tóxicos	~0	~0	traços	traços

FONTE: Adaptado de Von Sperling e Chernicharo (2005).

Os subitens a seguir detalham aspectos, condições e reações químicas e biológicas, pertinentes para as discussões posteriores, relacionadas à presença de matéria orgânica e de nitrogênio no esgoto.

### 2.2.1.1 Matéria orgânica

Os principais grupos de substâncias orgânicas encontradas nos esgotos são proteínas, carboidratos e gorduras, ou seja, combinações de carbono, hidrogênio e nitrogênio em variadas formas (METCALF & EDDY, 2016).

Os carboidratos contêm carbono, hidrogênio e oxigênio e são as primeiras substâncias a serem degradadas, produzindo ácidos orgânicos. As proteínas contêm carbono, hidrogênio, nitrogênio, e, por vezes, fósforo, enxofre e ferro. Já as gorduras englobam graxas, óleos e substâncias semelhantes, indesejáveis em um sistema de coleta e de tratamento de esgoto, por aderirem às paredes de tubulações, canais e módulos de tratamento, e por formarem espuma e maus odores. Por fim, os surfactantes são compostos orgânicos provenientes principalmente de detergentes, capazes de formar espuma estável e de difícil degradabilidade nas etapas de tratamento e no corpo receptor (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

A demanda bioquímica de oxigênio (DBO) determina a quantidade de matéria orgânica suscetível à oxidação através de processos biológicos, ou seja, representa a quantidade necessária de oxigênio para que ocorra o processo de quebra de produtos oxidáveis. A demanda química de oxigênio (DQO), de forma semelhante à DBO, expressa a quantidade de oxigênio necessária para degradar componentes orgânicos da amostra através de processos químicos de quebra de produtos (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Conforme a necessidade de remoção e a complexidade do composto orgânico a ser removido, processos unitários ou tecnologias complementares podem ser inseridas ao fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Von Sperling e Chernicharo (2005) indicam a tratabilidade do esgoto a partir da razão entre DQO e DBO. Para razões baixas, até 3,0, considera-se que a fração biodegradável é alta, indicando viabilidade para tratamento biológico. Já para razões intermediárias, entre 2,5 e 4,0, a fração inerte ou não biodegradável não é alta e deve-se verificar se há viabilidade para implementar tratamento biológico. Por fim, para razões elevadas, entre 3,5 ou 4,0 ou superiores, a fração inerte ou não biodegradável é alta e há possibilidade de viabilidade para implementar tratamento físico-químico.

Para utilizar e aplicar a relação DQO/DBO nas diferentes etapas de tratamento em uma ETE, recomenda-se encontrar a relação típica para cada caso.



Para tal, deve-se monitorar por um determinado período os dois parâmetros, estabelecer valores típicos para as duas variáveis e, por fim, encontrar a relação  $r$  a ser utilizada. A partir de então, pode-se realizar o monitoramento apenas em função da DQO, estimando a DBO, se necessário, a partir da relação estabelecida (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

#### 2.2.1.2 Reações anaeróbias e a decomposição da matéria orgânica

Processos unitários em que predominam atividades anaeróbias são comumente utilizados como etapa inicial de tratamento de esgoto doméstico, principalmente em países em desenvolvimento como o Brasil.

A oxidação total anaeróbia é composta por fases distintas chamadas de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (METCALF & EDDY, 2016).

Na hidrólise, o material particulado é convertido em compostos solúveis que podem ser hidrolisados a monômeros simples, utilizados pelas bactérias para realizar a fermentação. A hidrólise é realizada com enzimas extracelulares produzidas por diversos organismos anaeróbios e facultativos. Os carboidratos são convertidos a monossacarídeos, as proteínas a aminoácidos, e os lipídeos a ácidos graxos de cadeias longas, com pouco carbono (METCALF & EDDY, 2016).

Na acidogênese, as bactérias produzem ácidos graxos voláteis,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio. Os principais produtos da fermentação de açúcares e aminoácidos são acetato, propionato, butirato,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio (METCALF & EDDY, 2016).

Na acetogênese, a fermentação dos propionatos e butiratos produzidos na acidogênese produzem acetato,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio (METCALF & EDDY, 2016).

Por fim, a metanogênese é a conversão dos produtos da fermentação, acetato,  $\text{CO}_2$  e hidrogênio, em metano (METCALF & EDDY, 2016).

#### 2.2.1.3 Nitrogênio

O nitrogênio está presente no esgoto nas seguintes formas e estados de oxidação: nitrogênio orgânico, amônia livre ( $\text{NH}_3$ ), íon amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), íon nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e íon nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (MOTA E VON SPERLING, 2009).

A concentração de cada uma dessas formas é importante para determinar a poluição e o controle da qualidade das águas. O acontecimento ou não de reações de conversão das diferentes formas de nitrogênio pode indicar a disponibilidade de

oxigênio dissolvido e a alcalinidade do meio. A presença de uma ou outra forma de nitrogênio pode resultar em problemas como eutrofização de corpos hídricos, toxicidade aos peixes, entre outros (MOTA E VON SPERLING, 2009; JORDÃO E PESSOA, 2014).

É possível relacionar a presença das diferentes formas de nitrogênio com o grau de estabilização da matéria orgânica, uma vez que no esgoto fresco o nitrogênio está quase em sua totalidade combinado em forma de proteína e ureia, posteriormente transformados pelas bactérias em amônia, nitritos e nitratos. A concentração de cada uma dessas formas de nitrogênio indica a idade do esgoto ou o seu grau de estabilização (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

O resumo das diferentes condições do meio e as formas predominantes de nitrogênio encontradas está apresentado no Quadro 1.

Quadro 1 – Formas predominantes de nitrogênio conforme o meio

<b>Condição</b>	<b>Forma predominante do nitrogênio</b>
Esgoto bruto	Nitrogênio orgânico, Amônia
Poluição recente em corpo hídrico	Nitrogênio orgânico, Amônia
Estágio intermediário em corpo hídrico	Nitrogênio orgânico, Amônia, Nitrito (menor concentração), Nitrato
Poluição remota em corpo hídrico	Nitrato
Efluente de tratamento sem nitrificação	Nitrogênio orgânico (menor concentração) Amônia
Efluente de tratamento com nitrificação	Nitrato
Efluente de tratamento com nitrificação e desnitrificação	Concentrações reduzidas de todas as formas de nitrogênio

FONTE: Von Sperling e Chernicharo (2005).

A remoção das diferentes formas de nitrogênio presentes no esgoto ocorre baseada nas reações de conversão apresentadas no ciclo do nitrogênio e necessitam de processo aeróbio seguido de processo anóxico. Para que a atividade biológica ocorra de forma eficiente, há uma relação de proporção entre carbono, nitrogênio e fósforo de 130:5:1 (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005). As reações que compõem o ciclo do nitrogênio estão descritas no item 2.2.1.4.

#### 2.2.1.4 Reações aeróbias e anóxicas e o ciclo do nitrogênio

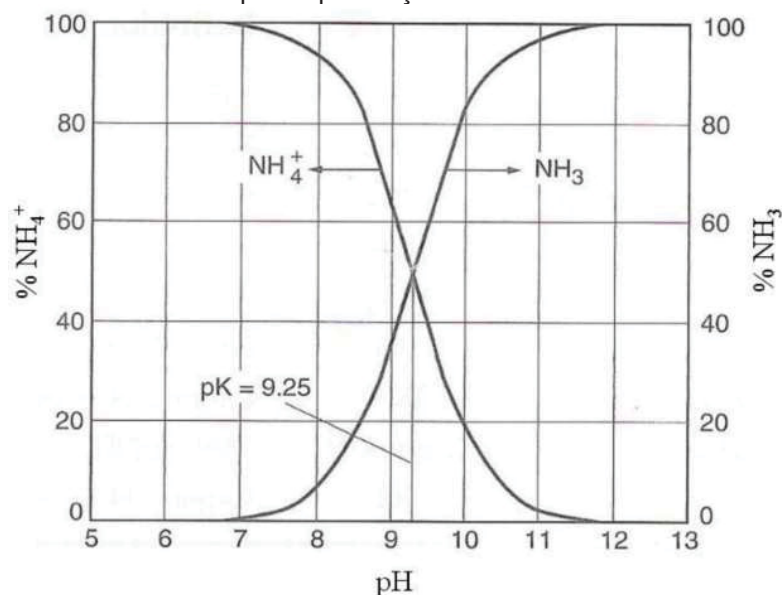
O ciclo do nitrogênio pode ser resumido nos processos de amonificação, nitrificação, desnitrificação do nitrato e fixação biológica (NUNES, 2012).

O nitrogênio orgânico presente no esgoto fresco é uma combinação de proteína, aminoácidos e ureia. A amonificação é a formação de nitrogênio amoniacal

que ocorre durante o processo de decomposição dessa matéria orgânica dissolvida, podendo ser resultante de um processo de decomposição aeróbio ou anaeróbio (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

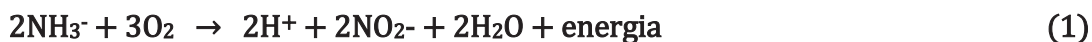
O nitrogênio amoniacal formado é instável e pode gerar amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) ou amônia ionizada ( $\text{NH}_4^+$ ). Dependendo do pH do meio, as concentrações destas duas formas de amônia são alteradas (NUNES, 2012). Em meio alcalino, prevalece a forma de amônia livre  $\text{NH}_3$ , enquanto para meios mais ácidos, predomina a amônia ionizada  $\text{NH}_4^+$ , tóxica para os peixes (METCALF & EDDY, 2016). Para pH até 8,0, predomina amônia ionizada  $\text{NH}_4^+$ ; para pH acima de 11,0, praticamente toda a amônia está na forma livre  $\text{NH}_3$ ; e para pH próximo a 9,5, tem-se um equilíbrio entre as duas formas (MOTA E VON SPERLING, 2009). Na Figura 4 é representada a variação da quantidade de amônia livre e ionizada conforme o pH do meio.

Figura 4 – Influência do pH na presença de amônia livre e amônia ionizada



FONTE: Metcalf & Eddy (2016).

O próximo processo do ciclo do nitrogênio é a nitrificação, que consiste na oxidação de amônia nas formas de nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), forma mais instável, reação chamada de nitritação, conforme equação 1, e, logo em seguida, em nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), reação chamada de nitratação, conforme equação 2 (JORDÃO E PESSÔA, 2014).



Enquanto a nitritação é uma reação lenta em função da baixa taxa de crescimento das bactérias *nitrosomonas*, a nitratação ocorre mais rapidamente pois as bactérias atuantes *nitrobacter*, catalisadas pelas enzimas oxidoredutase nítrico oxidase, apresentam maior taxa de crescimento. Ainda, o fato de o nítrico ser uma formação quimicamente instável favorece esta segunda etapa da nitrificação (NUNES, 2012).

Temperaturas mais altas favorecem o processo de nitrificação, dobrando a taxa de crescimento das bactérias para cada 7 °C acrescidos. A faixa ótima de temperatura é de 25 e 36 °C, enquanto a faixa ótima de pH para a nitrificação é de 7,2 a 8,0, sendo possível obter estabilidade a partir de pH igual a 6,5 (NUNES, 2012).

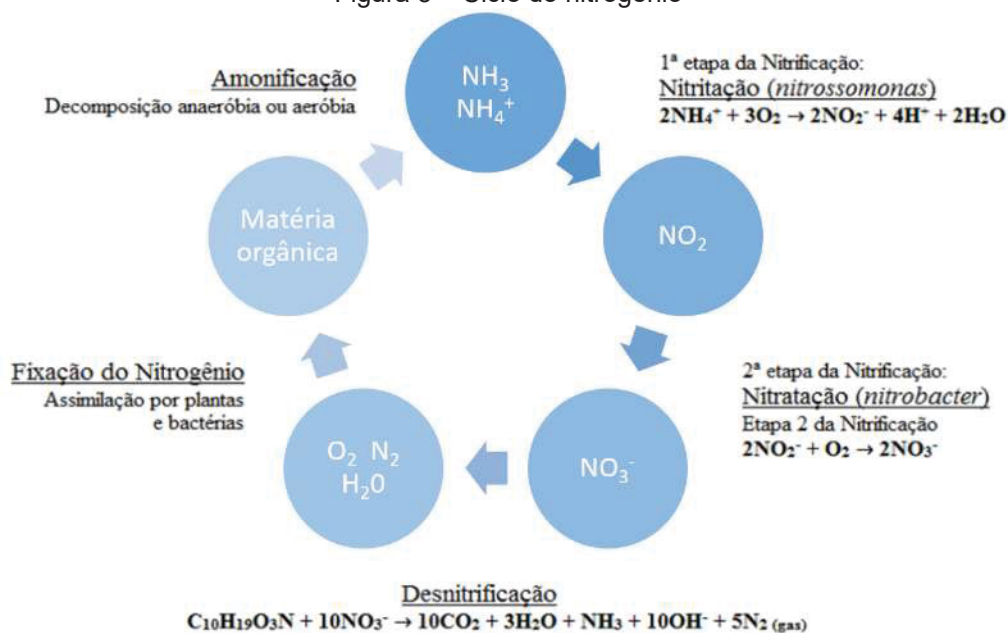
Alguns estudos realizados indicam ainda que a concentração de oxigênio dissolvido tem maior influência sobre as taxas de nitrificação do que a temperatura (METCALF & EDDY, 2016).

Com as reações de oxidação da nitrificação, as formas de amônia são eliminadas, porém o nitrogênio ainda está presente no meio, na forma de nitrato. Para remover completamente o nitrogênio, faz-se necessária ainda a etapa de desnitrificação. Na desnitrificação, o nitrato ( $\text{NO}_3$ ) é reduzido a nitrogênio gasoso ( $\text{N}_2$ ), que se desprende para a atmosfera. Este processo ocorre em meio anóxico, ou seja, em um meio em que o oxigênio dissolvido não está presente, sendo o limite de saturação do oxigênio estimado em 7 %. Neste meio, as bactérias facultativas heterotróficas utilizam o nitrato como fonte de oxigênio, reduzindo-o. Estas bactérias necessitam de determinada quantidade de carbono orgânico para desempenhar a função no processo de desnitrificação, conforme equação 3 (NUNES, 2012).



Os elementos e a sequência de reações que compõem o ciclo do nitrogênio estão resumidos na Figura 5.

Figura 5 – Ciclo do nitrogênio



FONTE: Adaptado de Von Sperling e Chernicharo (2005).

A quantidade de nitrogênio, nas suas diferentes formas, é medida pelo método *Kjeldahl*. O nitrogênio *Kjeldahl* (NTK) representa a soma do nitrogênio orgânico e do nitrogênio amoniacal. Se somado o NTK às quantidades de nitrito e nitrato, tem-se o nitrogênio total de uma amostra (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Recentemente foi descoberta ainda uma bactéria quimiolitotrófica específica capaz de remover nitrogênio de forma anaeróbia sem utilizar o carbono orgânico como fonte de energia para realizar o metabolismo, eliminando a necessidade de fonte adicional de carbono verificada em processos convencionais de desnitrificação (Zhu *et al.*, 2008). O processo foi chamado de *Anammox* (*anaerobic ammonium oxidation* ou oxidação anaeróbia de amônio) e é capaz de converter simultaneamente amônio e nitrito em nitrogênio gasoso. O processo ocorre com uma série de restrições e condicionantes do meio para que as bactérias promovam a oxidação e, por este motivo, representa maiores custos de operação e manutenção (Zhang *et al.*, 2008). Por outro lado, o *Anammox* representa economia em relação ao tamanho dos reatores e em relação à não necessidade de aeração forçada, economizando cerca de 60 % de energia se comparado a processos convencionais aerados, gerando menos lodo em função do baixo crescimento celular (Isaka *et al.*, 2006).

## 2.2.2 Características físicas e químicas que influenciam os processos de tratamento de esgoto

O esgoto doméstico apresenta condições físicas e químicas que influenciam as reações físicas, químicas e biológicas realizadas nos processos de tratamento. Os subitens a seguir detalham algumas das características físicas e químicas pertinentes para as discussões posteriores, relacionadas à temperatura, acidez e alcalinidade e oxigênio dissolvido.

### 2.2.2.1 Temperatura

Por influenciar a viscosidade do esgoto, a solubilidade dos gases, a saturação de oxigênio dissolvido na água, a atividade bacteriana e as taxas de reações biológicas e químicas, a temperatura é uma característica muito significativa nos processos de tratamento de esgoto (JORDÃO E PESSÔA, 2014; VON SPERLING, 1996).

A solubilidade do oxigênio na água diminui com o aumento da temperatura. A 20 °C, a concentração do oxigênio na água é de 9 mg/l e a 35°C, menos de 7 mg/l. À medida em que a temperatura é elevada, as atividades biológicas são estimuladas, aumentando o consumo de oxigênio, sendo a faixa ótima entre 25 e 35 °C. Por outro lado, abaixo de 15 °C, a digestão anaeróbia praticamente não ocorre (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

### 2.2.2.2 Acidez e Alcalinidade

O potencial hidrogeniônico (pH) é o parâmetro utilizado para mensurar e determinar se a solução está ácida, neutra ou alcalina e representa a concentração de íons de hidrogênio em escala antilogarítmica, variando de 0 a 14, a 25 °C (VON SPERLING, 1996).

A acidez ou alcalinidade do esgoto é uma característica importante para controle e operação de sistemas de tratamento de esgoto, principalmente na digestão anaeróbia, na coagulação química e nos processos oxidativos, uma vez que influencia a velocidade da nitrificação (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Para os processos de tratamento de esgoto, valores de pH afastados da neutralidade tendem a afetar as taxas de crescimento dos micro-organismos. O pH

também pode variar de acordo com o metabolismo dos organismos presentes e atua diretamente nos processos de permeabilidade da membrana celular, interferindo no transporte iônico celular e entre organismos e meio (VON SPERLING, 1996).

Para a existência de vida aquática nos corpos hídricos, o pH encontra-se entre 6 e 9. A acidez está relacionada à presença de gás carbônico livre, enquanto a alcalinidade, à presença de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

#### 2.2.2.3 Oxigênio dissolvido

O oxigênio dissolvido (OD) é requerido para a respiração dos micro-organismos aeróbios e indica a concentração de oxigênio dissolvido na água, em mg/l (METCALF & EDDY, 2016). A quantidade presente na solução depende da solubilidade do gás, da pressão relativa, da temperatura e da concentração de impurezas. A temperatura e a pressão são os dois principais fatores a considerar para a solubilidade do oxigênio na água. Com a elevação da temperatura e diminuição da pressão, ocorre redução e solubilidade do oxigênio na água (ESTEVES, 1998).

As perdas do oxigênio dissolvido são resultado do consumo em função da decomposição da matéria orgânica, além de perdas por difusão para a atmosfera, respiração de organismos aquáticos, no caso de corpos hídricos, e oxidação de íons metálicos como ferro e manganês (ESTEVES, 1998).

A concentração de oxigênio dissolvido influencia os processos de conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato, sendo considerado como fator mais relevante se comparado à temperatura, para que ocorra a nitrificação (METCALF & EDDY, 2016).

### 2.3 QUALIDADE DO EFLUENTE TRATADO PARA LANÇAMENTO EM CORPOS HÍDRICOS

#### 2.3.1 Exigências legais quanto à qualidade do efluente tratado no Brasil e no Paraná

A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente CONAMA Nº 430/2011 complementa a Resolução Nº 357/2005 quanto às condições e padrões de lançamento de efluentes no Brasil.



Já a Resolução da Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Paraná SEMA Nº 21/2009 dispõe sobre licenciamento ambiental e estabelece parâmetros mínimos de lançamento de esgoto em corpos receptores municipais e estaduais.

Os limites definidos para materiais sedimentáveis, óleos minerais, vegetais e gordura animal, materiais flutuantes, DBO, DQO, nitrogênio amoniacal e fósforo nas Resoluções supracitadas estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Limites de lançamento aplicáveis às estações de tratamento de esgoto estabelecidos pelo CONAMA em nível nacional e pela SEMA-PR em nível estadual

Variável	Unidade	CONAMA 430/2011	SEMA 021/2009
pH	-	<b>5 a 9</b>	
Temperatura	°C	<b>≤40</b> <b>Tzona mistura ±3</b>	
Materiais sedimentáveis	ml/L	<b>≤1</b>	
Óleos minerais	mg/l	<b>≤20</b>	<b>≤20</b>
Óleos vegetais e gordura animal	mg/l	<b>≤50</b>	<b>≤50</b>
Materiais flutuantes	-	<b>Ausentes</b>	
DBO (eficiência)	% removida	<b>≥60</b>	
DBO	mg/l	<b>≤120</b>	<b>≤90</b>
DQO	mg/l	<b>-</b>	<b>≤225</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/l	<b>≤20</b>	
P	mg/l	<b>A definir</b> <b>(órgão ambiental)</b>	

FONTE: Brasil (2005); Brasil (2011); Paraná (2009).

Ressalta-se que os valores são limites máximos, sendo que, no Estado do Paraná, para cada estação de tratamento de esgoto podem ser exigidos padrões mais restritivos de lançamento, conforme o porte do corpo receptor, a capacidade de diluição e a disponibilidade hídrica em relação a outros usos do mesmo corpo hídrico. Os limites são estabelecidos para cada empreendimento por meio da Licença Ambiental, concedida pelo Instituto Ambiental do Paraná (IAP), e da Outorga de Direito, emitida pelo Instituto das Águas do Paraná (AGUASPARANÁ), para rios estaduais, ou pela Agência Nacional de Águas (ANA), para rios federais.

A Resolução CONAMA Nº 430/2011 complementa que as condições e padrões de lançamento relacionados na Seção II, art. 16, incisos I e II poderão ser aplicáveis aos sistemas de tratamento de esgoto sanitário, a critério do órgão ambiental competente e em função das características locais, não sendo exigível o padrão de nitrogênio amoniacal total até o presente momento.

### 2.3.2 Exigências legais quanto à qualidade do efluente final na Alemanha

A Portaria alemã “*Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer - Abwasserverordnung - AbwV*” (Portaria sobre os requisitos para a descarga de águas residuais nos corpos d'água - regulamento das águas residuais - Tratamento de águas residuais), de 1997, estabelece parâmetros para lançamento de esgoto de característica predominantemente doméstica, ou seja, se aplica a ETEs municipais que recebem efluentes de instalações domésticas ou similares, tais como alojamento comunitário, Hotéis, restaurantes, acampamentos, hospitais, edifícios de escritórios, entre outros similares, além de efluentes industriais com características conhecidas e controladas, em condição de pré-tratamento quando necessário. Para os casos de efluentes industriais ou não domésticos, a Portaria cita que o efluente pode ter outra origem diferente das supracitadas, desde que as características destas águas residuais não sejam nocivas aos processos biológicos que ocorrem na estação de tratamento (AbwV, 1997).

Como requisitos gerais, a Portaria determina ainda que as instalações de esgotamento sanitário, incluindo sistemas de coleta e de tratamento, devem ser construídas, operadas e utilizadas de forma a apresentar eficiência energética. Segundo a AbwV (1997), as plantas de tratamento de esgoto que aproveitam os subprodutos provenientes dos processos de tratamento do esgoto para geração de energia são tecnicamente possíveis e apresentam viabilidade econômica.

Quanto aos requisitos para o lançamento do efluente tratado, os limites para DQO, DBO, nitrogênio amoniacal, nitrogênio total e fósforo total são definidos minimamente conforme a carga de DBO afluente, conforme apresentado na Tabela 3 (AbwV, 1997).

Tabela 3 – Limites de lançamento estabelecidos de acordo com classes de carga afluente nas ETEs

Classe da ETE de acordo com a DBO afluente	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	N <sub>total</sub> (mg/l)	P <sub>total</sub> (mg/l)
Classe 1 (< 60 kg/d)	<b>150</b>	<b>40</b>	-	-	-
Classe 2 (60 a 300 kg/d)	<b>110</b>	<b>25</b>	-	-	-
Classe 3 (300 a 600 kg/d)	<b>90</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	-	-
Classe 4 (600 a 6000 kg/d)	<b>90</b>	<b>20</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>2</b>
Classe 5 (> 6000 kg/d)	<b>75</b>	<b>15</b>	<b>10</b>	<b>13</b>	<b>1</b>

FONTE: Alemanha (1997).

Ressalta-se que os valores apresentados são limites, sendo que para cada estação de tratamento de esgoto podem ser exigidos padrões mais restritivos de

lançamento, conforme o porte do corpo receptor, a capacidade de diluição e a disponibilidade hídrica em relação a outros usos do mesmo corpo hídrico.

Os requisitos apresentados para nitrogênio amoniacal e nitrogênio total são exigidos desde que a temperatura do esgoto afluyente esteja superior a 12 °C. Entre outubro e maio, as baixas temperaturas e a significativa redução de temperatura do esgoto afluyente implicam na redução da atividade biológica nos processos de tratamento e podem, por tanto, justificar o não atingimento dos limites mínimos para nitrogênio. Ainda, pode ser permitida uma concentração superior a 25 mg/l para nitrogênio total caso seja comprovada a redução da pegada total de nitrogênio em pelo menos 70 % (AbwV, 1997).

## 2.4 PROCESSOS UNITÁRIOS PARA TRATAMENTO DE ESGOTO

As estações de tratamento de esgoto são compostas por uma sequência de operações e processos unitários empregados para a remoção de cargas poluentes e substâncias indesejáveis, podendo ser classificados como processos físicos, biológicos e químicos (JORDÃO E PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

Os processos físicos incluem retenção de sólidos grosseiros, materiais flutuantes e sedimentos inorgânicos, bem como separação de fases líquida e sólida, através de processos de gradeamento e peneiramento, sedimentação, diferentes métodos de filtração, além de processos para desaguamento, adensamento, homogeneização e incineração de lodo, entre outros (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

São considerados processos biológicos aqueles que dependem da ação de micro-organismos para transformar componentes complexos presentes no esgoto em compostos simples, através da oxidação anaeróbia ou aeróbia. Os reatores anaeróbios de leito fluidizado, as diferentes configurações de lagoas e de filtros biológicos, bem como os sistemas de lodos ativados, entre outros métodos e tecnologias, são exemplos de processos de tratamento biológicos (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Já nos processos químicos, predomina a utilização de produtos químicos para que o objetivo do tratamento seja alcançado. Normalmente são utilizados quando os processos físicos e biológicos não são suficientes para atingir a qualidade desejada do efluente final ou para remover determinado poluente específico. Como exemplos de processos químicos, pode-se citar a coagulação e a floculação, a precipitação

química, a oxidação química e diferentes métodos de desinfecção como a cloração, entre outros (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Há ainda outros processos físicos, biológicos e químicos considerados avançados, como adsorção por carvão ativado, filtração rápida, filtração por membranas, nitrificação anaeróbia (*Anammox*), osmose inversa, troca iônica, entre outros (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

As transformações físicas, biológicas e químicas nem sempre ocorrem espontaneamente ou isoladamente em cada operação unitária. A fim de aumentar a eficiência de um processo físico de retenção de sólidos, por exemplo, pode-se adicionar floculantes ou coagulantes, tendo um processo físico auxiliado, portanto, por um processo químico, como a decantação acelerada ou a flotação por ar dissolvido. A identificação do processo de tratamento como físico, biológico ou químico pode ser dada pelo fenômeno predominante (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

A descrição dos processos unitários e das etapas de tratamento de esgoto apresentada a seguir limita-se àqueles mais significativos para subsidiar as discussões propostas neste estudo.

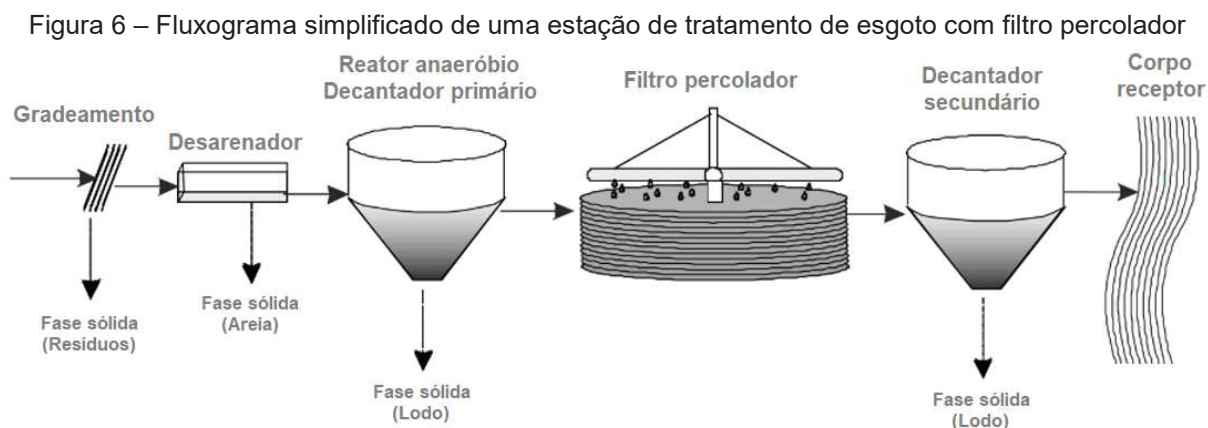
## 2.5 PROCESSOS UNITÁRIOS QUE COMPÕEM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM FILTROS PERCOLADORES

Os filtros percoladores podem ser amplamente utilizados para tratamento de esgoto, sobretudo em países em desenvolvimento, principalmente pela simplicidade de funcionamento e pelo custo de operação reduzido (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Para ser empregado em uma estação de tratamento de esgoto, o filtro percolador deve ser precedido pelas etapas de retenção de sólidos grosseiros, realizada com equipamentos de gradeamento e peneiramento, bem como a retenção de areia e gordura, realizada nos desarenadores e caixas de gordura, ou em sistemas combinados. Na sequência, é necessário promover a retenção de sólidos sedimentáveis em unidades de decantação primária, reatores anaeróbios ou lagoas de decantação, por exemplo (ABNT, 2011; VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Após o filtro percolador, é necessário empregar ainda uma etapa de decantação secundária para retenção de sólidos (ABNT, 2011; VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

As etapas de tratamento que convencionalmente compõem uma estação de tratamento de esgoto com filtros percoladores estão representadas na Figura 6.



FONTE: Adaptado de Von Sperling e Chernicharo (2005).

Outros processos e tecnologias de tratamento podem ser adicionados a este fluxograma, em caráter complementar, dependendo da qualidade desejada para o efluente final.

## 2.5.1 Processos unitários a montante do filtro percolador

### 2.5.1.1 Processos e equipamentos para retenção de sólidos grosseiros

A retenção de sólidos grosseiros em estações de tratamento de esgoto é realizada por grades, manuais ou mecanizadas, classificadas como grossas, médias ou finas, variando de acordo com o espaçamento entre as barras. Enquanto as grades grossas retêm materiais de maiores dimensões, as grades médias e finas ou as peneiras finas devem ser utilizadas na sequência para reter os materiais sólidos com dimensões superiores a 3 mm. Além de retirar estes materiais do esgoto afluyente e remover parte da carga poluidora nesta etapa preliminar de tratamento, a retenção de sólidos grosseiros protege as tubulações, o meio filtrante e os equipamentos como bombas, raspadores, aeradores e meios filtrantes contra incrustações, entupimentos e outros danos ao longo do tempo (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Para as grades mecanizadas, há diferentes mecanismos de acionamento de limpeza. Nas mais simples, os rastelos são acionados por meio de cabos ou correntes. Já os modelos de cremalheira, esteira e escalar ou *step screen* são mais modernos e apresentam vantagens de operação e manutenção (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Em substituição às grades finas, também foram desenvolvidas peneiras finas, que podem ser estáticas ou móveis. As estáticas caracterizam-se por serem capazes de promover autolimpeza. Já as móveis podem ser de fluxo axial, tangencial ou frontal. Independentemente do tipo de peneira, recomenda-se que sejam sempre precedidas de gradeamento com espaçamento superior, para evitar que materiais de maiores dimensões danifiquem ou impeçam o bom funcionamento desses equipamentos (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Os materiais removidos nestes equipamentos devem passar por desaguamento e podem ser incinerados ou destinados a aterros sanitários licenciados (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

#### 2.5.1.2 Processos e equipamentos para retenção de areia e gordura

A retenção de areia e de gordura do esgoto evita abrasão e obstrução de equipamentos, tubulações, caixas de distribuição ou de manobra, poços de visita ou poços de bombas em um sistema de tratamento de esgoto, sendo de fundamental importância para o processo de tratamento e para a eficiência de uma ETE (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

O princípio da remoção da areia é proporcionar uma velocidade do fluído tal que apenas a areia sedimente e fique retida no desarenador. Nas caixas de areia convencionais, de escoamento horizontal, retangulares, com sedimentação por gravidade, condiciona-se a velocidade do fluxo horizontal para cerca de 0,3 m/s. Velocidades em torno de 0,15 m/s provocam a sedimentação não só da areia, mas também de material orgânico, não desejado nesta etapa preliminar de tratamento (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

As caixas de areia podem ser de seção retangular ou circular, de fundo plano, prismático ou cônico. A separação das fases sólida e líquida pode ser por gravidade, de forma natural, ou aerada, ou por centrifugação, *vortex* e centrífuga. A remoção do material sólido pode ser manual, por ciclone separador ou mecanizada, com raspador, bombas centrífugas, de sucção ou *air lift* (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

A areia retida pode ser lavada e desaguada. Dependendo da qualidade da lavagem realizada e da limpeza desse material, pode-se reutilizar a areia como material drenante para os leitos de secagem de lodo, por exemplo, ou ainda como material para assentamento de tubulações em obras diversas. Caso não seja realizada prática de reuso para a areia, esta deve ser encaminhada para disposição final em aterro sanitário licenciado (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Quanto à gordura que compõe o esgoto doméstico, parte fica retida ainda nas caixas de gordura instaladas nas residências e edificações, conforme preconiza a NBR 8160/1999 referente a sistemas prediais de esgoto sanitário (ABNT, 1999).

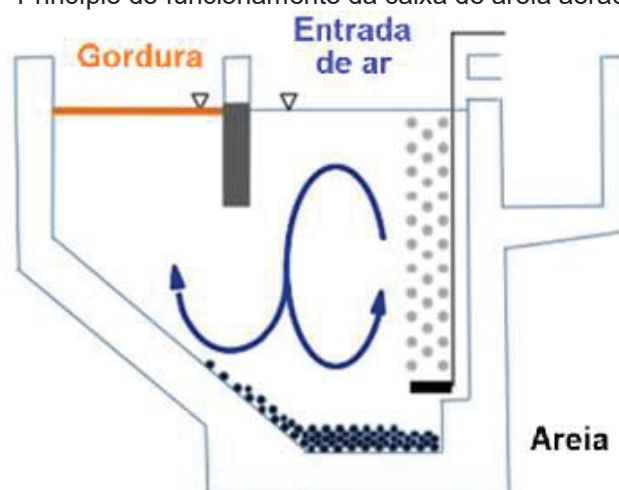
Nas estações de tratamento de esgoto, etapas específicas para remoção de gordura podem ser empregadas, como as caixas aeradas, por exemplo. Nas unidades de decantação primária ou em reatores anaeróbios, podem ser instalados dispositivos para remoção de espuma, que é composta por gorduras, óleos e graxas e sólidos suspensos aderidos. Outras etapas como tanques aerados, separadores de óleo ou unidades de flotação por ar dissolvido também podem ser empregadas para a remoção de óleos e graxas como uma etapa de tratamento na ETE (JORDÃO E PESSÔA, 2014)

As caixas de areia aeradas foram concebidas para promover a retenção de areia e de gorduras em apenas uma unidade construída. As unidades aeradas são caracterizadas pela instalação de um sistema de aeração por ar comprimido, com aspersores dispostos próximo ao fundo do tanque responsáveis por promover um fluxo helicoidal de velocidade padrão, sendo o eixo deste fluxo paralelo ao fluxo do esgoto na câmara de sedimentação da areia. As partículas com velocidade de sedimentação maior tendem a ir para a câmara que acumula a areia, enquanto a matéria orgânica e demais partículas aderidas à gordura tendem a ficar na superfície. Para retirada da areia depositada no fundo da estrutura, são instaladas bombas de sucção. Para a retirada do material flotado, é utilizado um equipamento mecânico raspador apoiado nas laterais do tanque, recolhendo longitudinalmente o material e direcionando o material para uma calha coletora de gordura (DWA, 2016).

Na Figura 7 está representado o funcionamento de uma caixa de areia aerada em corte.



Figura 7 – Princípio de funcionamento da caixa de areia aerada em corte



FONTE: Adaptado de DWA (2016).

### 2.5.1.3 Decantadores primários

Após a retenção de sólidos grosseiros e areia no tratamento preliminar, é necessário remover os sólidos facilmente sedimentáveis através do processo de decantação ou sedimentação primária. Segundo Jordão e Pessoa (2014), a retenção de sólidos em suspensão é da ordem de 40 a 60 % e a remoção de DBO, de 25 a 35 %, sendo que valores inferiores podem indicar falhas no processo.

Já Metcalf & Eddy (2016) afirmam que o processo de sedimentação primária pode remover de 50 a 70 % de sólidos suspensos e de 25 a 40 % da DBO, quando os tanques são eficientemente operados.

Na Tabela 4 é possível verificar os principais parâmetros para dimensionamento de decantadores primários quando seguidos de tratamento secundário, enquanto na Tabela 5, para decantadores primários que recebem retorno de lodo de sistemas de lodos ativados.

Tabela 4 – Parâmetros para projeto de decantador primário seguido de tratamento secundário

	Faixa	Típica	Unidade
<b>Tempo de detenção</b>	1,5 a 2,5	2,0	h
<b>Taxa de escoamento superficial</b>			
Vazão média	30 a 50	40	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d
Vazão de pico	80 a 120	100	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d
<b>Taxa de carga nos vertedores</b>	125 a 500	250	m <sup>3</sup> /m·d

FONTE: Metcalf &amp; Eddy (2016).

Tabela 5 – Parâmetros para projeto de decantador primário com retorno de excesso de lodo ativado

	<b>Faixa</b>	<b>Típica</b>	<b>Unidade</b>
<b>Tempo de detenção</b>	1,5 a 2,5	2,0	h
<b>Taxa de escoamento superficial</b>			
Vazão média	24 a 32	28	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d
Vazão de pico	48 a 70	60	m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d
<b>Taxa de carga nos vertedores</b>	125 a 500	250	m <sup>3</sup> /m·d

FONTE: Metcalf &amp; Eddy (2016).

#### 2.5.1.4 Reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta do lodo

Os reatores anaeróbios funcionam a partir do princípio de retenção de biomassa, baixo tempo de detenção hidráulica e elevado tempo de retenção celular, classificando este processo unitário como um sistema de alta taxa, subdividido em dois grupos, conforme o crescimento da biomassa, sendo um por crescimento disperso e outro por crescimento aderido (CHERNICHARO, 2016).

Enquanto o crescimento microbiano disperso está relacionado à presença de grânulos livres, o aderido é caracterizado pela formação e desenvolvimento de microorganismos agregados a um meio suporte de material inerte, levando à formação de um biofilme (CHERNICHARO, 2016).

O reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo foi inicialmente desenvolvido e aplicado na Holanda. Na década de 70, o Prof. Gatze Lettinga e equipe desenvolveram, na Universidade de *Wageningen* um modelo de reator anaeróbio de fluxo ascendente, com separação das fases líquida, sólida e gasosa. Este modelo recebeu o nome de *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors* ou reatores de manto de lodo anaeróbio de fluxo ascendente (UASB), sendo esta terminologia “UASB” utilizada atualmente (CHERNICHARO, 2016; JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Em 1991, Lettinga e Hulshof Pol fizeram considerações sobre o dimensionamento e projeto de reatores UASB, citando que as variáveis mais significativas são as características do afluente em termos de sólidos, a carga orgânica volumétrica, a velocidade ascensional, o volume do reator, as características físicas, incluindo o sistema de distribuição, e o sistema de coleta de gás (METCALF & EDDY, 2016).

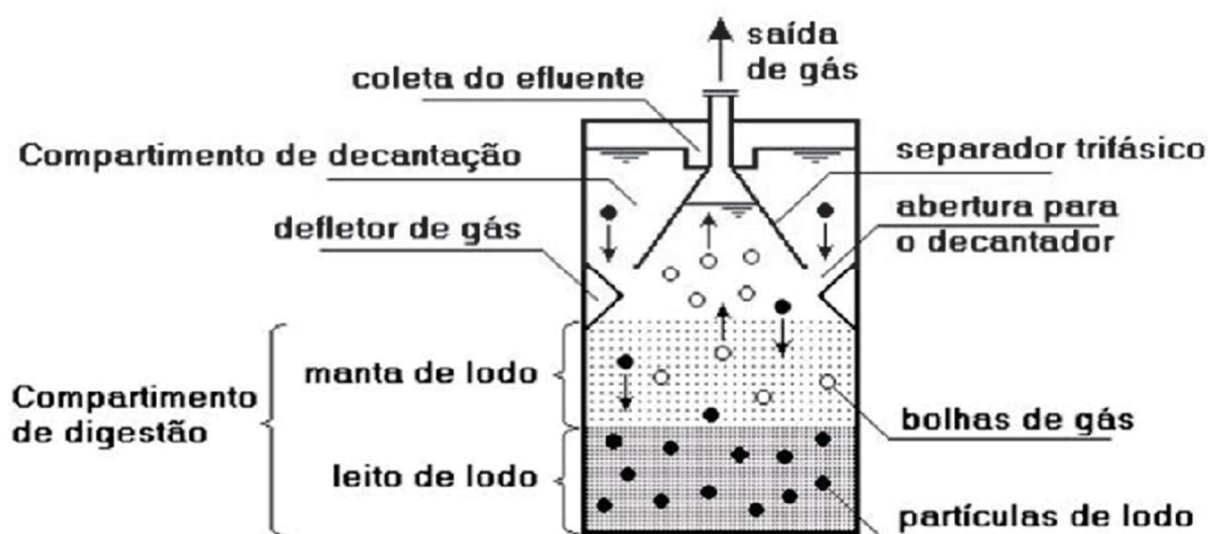
O afluente é distribuído a partir do fundo do reator e o processo consiste na passagem de um fluxo ascendente de esgoto através de um leito denso e de elevada atividade biológica que se estabelece nas camadas mais inferiores do reator. A estabilização da matéria orgânica acontece ao longo de toda a altura do reator, do

leito de lodo, mais ao fundo, à manta de lodo, uma camada de lodo mais leve e dispersa nas camadas mais superiores (CHERNICHARO, 2016).

Internamente, dispositivos específicos promovem a separação trifásica, garantindo condições ótimas para a sedimentação da fase sólida e das partículas que se desgarram do manto de lodo, fazendo com que estas retornem à camada de digestão anaeróbia no leito de lodo, promovendo a separação dos gases provenientes da digestão anaeróbia, e resultando na saída de um efluente por meio de vertedores na camada mais superior do reator (CHERNICHARO, 2016).

Na Figura 8 é possível identificar o leito e a manta de lodo, os dispositivos para separação trifásica, o defletor de gás e o caminho percorrido por partículas sólidas e gasosas. Ambos dispositivos são barreiras para que os gases e as partículas sólidas permaneçam no reator e para que o efluente seja clarificado.

Figura 8 – Representação em corte de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo



FONTE: Chernicharo (2016).

A instalação dos dispositivos para separação trifásica e dos defletores fazem com que os reatores promovam tratamento anaeróbio com baixo tempo de detenção hidráulica, porém com alto tempo de residência celular, ou idade do lodo, o que confere a esses reatores a operação em alta taxa. A idade do lodo é de cerca de 30 dias, proporcionando uma condição de lodo excedente a ser descartado já estabilizado biologicamente, dispensando o uso de digestores de lodo (CHERNICHARO, 2016).

A eficiência do tratamento anaeróbio para esgoto doméstico é da ordem de 40 a 75 % para DQO e 45 a 85 % para DBO. Esta variação de eficiência indicada pela

literatura pode ocorrer em função do tempo de detenção hidráulica e de ações de operação e de manutenção do reator, incluindo principalmente o gerenciamento de retirada de lodo e de espuma (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Deve-se atentar para que as etapas a montante do reator estejam adequadas para garantir a eficiência esperada. A retenção de areia e sólidos grosseiros a montante evita entupimentos e baixa eficiência, que seria causada por material inerte acumulado e diminuição do volume ocupado por material biológico. A distribuição adequada do afluente, a correta velocidade ascensional no reator, bem como a retirada periódica de lodo e de espuma, também estão entre os cuidados fundamentais apontados por Jordão e Pessôa (2014) para a operação de um reator.

Determinar a periodicidade para proceder a retirada do lodo do reator anaeróbio é fundamental se forem consideradas consequências tais como a saturação e a perda de sólidos no efluente do reator, bem como a redução da eficiência do reator e dos demais processos a jusante (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

No caso de filtros percoladores, os sólidos e a gordura não retidos no reator anaeróbio provocam principalmente o entupimento do sistema de distribuição e a colmatação do meio suporte, entre outros. A avaliação do teor de sólidos do lodo no interior do reator é feita a partir de coleta de amostras de diferentes alturas do reator, tornando possível a verificação da concentração de sólidos, tipicamente entre 3,5 e 5,0 %, sendo essa verificação fundamental para determinar a periodicidade da remoção e impedir a perda de sólidos (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Cabe ressaltar que a normalidade no processo depende do dimensionamento estabelecido no projeto, do gradeamento eficiente, da presença de areia no digestor, da estabilização do lodo a ser retirado e encaminhado para a desidratação e até mesmo da distribuição do afluente com vazão adequada dos tubos de 100 a 150 mm, como recomendado por Jordão e Pessôa (2014).

#### 2.5.1.5 Comparação entre decantadores primários e reatores anaeróbios

Os decantadores primários, adensadores de lodo e digestores anaeróbios de lodo podem ser substituídos por reatores anaeróbios, que possibilitam a digestão parcial do lodo no próprio reator, sendo, portanto, não apenas um processo físico de decantação, mas também um processo biológico de tratamento da fase líquida e de estabilização da fase sólida. Ao empregar um decantador primário, as estruturas de

adensamento e digestão de lodo são necessárias, ao passo que o reator anaeróbio dispensa tais etapas (SOBRINHO E JORDÃO, 2015).

Sendo o reator anaeróbio um processo físico e biológico, a eficiência de remoção de matéria orgânica é aproximadamente duas vezes superior se comparada à de um decantador primário. O dimensionamento de um reator biológico aeróbio a jusante, seja um filtro percolador, um tanque de aeração ou outro processo unitário, pode ser otimizado, considerando que boa parte da matéria orgânica já foi degradada (SOBRINHO E JORDÃO, 2015).

Para o caso de ETEs com sistema de lodos ativados, a utilização de reatores anaeróbios à montante reduz o consumo de energia para aeração em cerca de 45 a 55 %, se comparado a ETEs com decantadores primários à montante dos tanques de lodos ativados, para sistemas que não realizam nitrificação. Em sistemas em que a nitrificação é quase total, essa faixa passa para cerca de 65 a 70 % (SOBRINHO E JORDÃO, 2015).

É oportuno destacar a importância de alcançar o percentual desejável de remoção de DBO na etapa inicial de tratamento, visto que influencia diretamente o dimensionamento do tratamento secundário (JORDÃO E PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

Cabe acrescentar que se a ETE for composta por processos aeróbios com demanda de energia para aeração, como ocorre em um processo de lodos ativados, por exemplo, a maior carga de DBO proveniente da decantação primária representa maiores custos operacionais no tratamento, ou seja, a eficiência de um processo a montante impacta no processo a jusante, quanto à eficiência e quanto aos custos operacionais (JORDÃO E PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

#### 2.5.1.6 Combinação de processos anaeróbios de alta taxa e processos aeróbios

Espera-se para um futuro próximo uma ampliação da utilização de sistemas anaeróbios e aeróbios combinados para o tratamento de esgoto devido principalmente a questões relacionadas ao consumo energético (METCALF & EDDY, 2016).

Processos anaeróbios de alta taxa como os reatores anaeróbios tipo UASB podem ser uma alternativa adequada para o tratamento de esgoto predominantemente doméstico por ser compacto, ter baixo custo de construção, baixa

produção de lodo em excesso, baixo consumo de energia e potencial para recuperação de biogás (METCALF & EDDY, 2016).

Para se obter um efluente de maior qualidade, adiciona-se ao fluxograma da ETE um processo aeróbio visando à remoção adicional de sólidos e matéria orgânica, bem como à conversão de nitrogênio (METCALF & EDDY, 2016).

### 2.5.2 Filtros percoladores

Os filtros percoladores são concebidos em uma estrutura composta por tubulações de entrada e saída, por um sistema de distribuição do afluente na superfície superior do filtro e por um material empregado como meio suporte para fixação de um filme biológico não submerso, chamado biofilme, responsável pelo tratamento biológico predominantemente aeróbio a partir da atuação de micro-organismos, bactérias aeróbias e facultativas, protozoários, fungos e algas, bem como de organismos superiores como vermes, larvas, insetos e caramujos (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

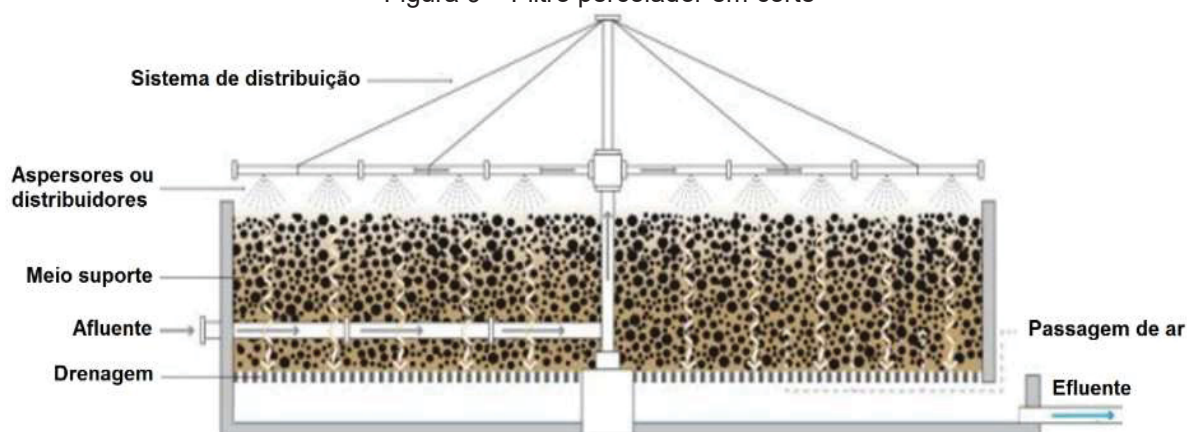
O meio suporte pode ser composto por pedra brita, pedra lava, escória de alto forno, seixo rolado ou materiais plásticos randômicos ou estruturados, através do qual o esgoto deve ser uniformemente e constantemente distribuído. O tratamento do esgoto acontece à medida que o afluente percola o meio suporte e entra em contato com o biofilme aderido (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

A atuação do biofilme e dos micro-organismos reduz a concentração e a carga de matéria orgânica e pode promover reações de conversão do nitrogênio ao longo do filtro. As eficiências obtidas dependem das condições do afluente, do dimensionamento, do meio suporte utilizado, entre outras variáveis (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

Na Figura 9 e na Figura 10 é possível identificar todas as partes componentes de um filtro percolador.

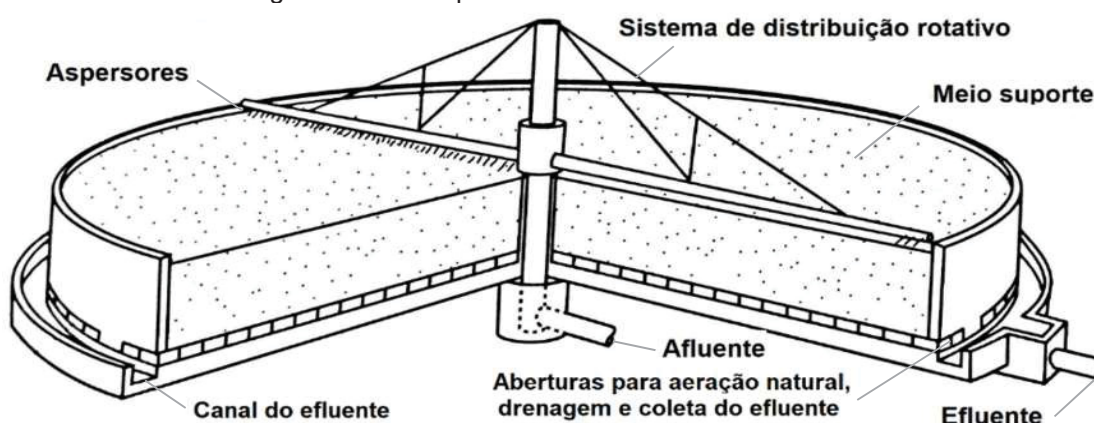


Figura 9 – Filtro percolador em corte



FONTE: Adaptado de Tilley *et al.* (2014).

Figura 10 – Filtro percolador em corte tridimensional



FONTE: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016).

Apesar de ser chamado de “filtro”, a principal ação do filtro percolador não é a filtração mecânica, mas sim a degradação da matéria orgânica realizada a partir do metabolismo e atividade biológica de micro-organismos e bactérias presentes no biofilme aderido ao meio suporte. Assim, o que promove o tratamento nos filtros percoladores não é a filtração mecânica, mas sim a atividade biológica (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

As principais vantagens atribuídas aos filtros percoladores são o menor consumo de energia, a operação simplificada, a não preocupação com a formação de lodo com baixa massa específica nos decantadores secundários, a obtenção de lodo com melhores características de adensamento, a reduzida demanda de manutenção de equipamentos eletromecânicos e a melhor recuperação após a ocorrência eventual de cargas tóxicas, se comparado a sistemas com lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).



Algumas desvantagens e problemas apontados, tais como potencial para geração de maus odores ou qualidade inferior do efluente final em função do desprendimento de sólidos, muitas vezes estão associados aos processos unitários a montante ou a jusante dos filtros percoladores, incluindo casos em que o projeto apresenta erros ou divergências de dimensionamento ou quanto à ventilação inadequada ou à alimentação do afluente ao filtro inadequada, por exemplo; casos em que houve falhas de obra; ou, ainda, casos de operação inadequada ou falta de manutenção (WEF, 2011). As limitações dos filtros percoladores em si estão mais relacionadas à dificuldade para remoção biológica de nitrogênio e fósforo, se comparados a sistemas com lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).

A partir de um projeto adequado e de uma operação com cargas hidráulicas e volumétricas condizentes ao objetivo de tratamento, com procedimentos de manutenção e limpeza preventivas, o efluente final pode chegar a concentrações de DBO inferiores a 20 mg/l, quando projetado para promover a nitrificação, obtendo concentrações de nitrogênio amoniacal da ordem de 3 mg/l, ou inferiores a 1 mg/l, quando o filtro é dimensionado objetivando a nitrificação terciária (METCALF & EDDY, 2016).

Os subitens a seguir são dedicados à apresentação dos principais aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores.

#### 2.5.2.1 Histórico das equações de dimensionamento de filtros percoladores

Os filtros percoladores, apesar de oferecerem simplicidade de conceito, funcionamento, operação e manutenção, apresentam características e fatores complexos em termos de crescimento da biomassa aderida e das condições hidrodinâmicas internas. A espessura do biofilme, o grau de cobertura do meio suporte, o crescimento não uniforme e a variação da concentração de sólidos na biomassa, bem como a vazão afluente variável, a distribuição não uniforme, entre outras, são fatores que impõem uma série de variáveis a serem consideradas para a elaboração de um projeto. Assim, o projeto envolve a utilização de parâmetros abrangentes como carga orgânica volumétrica, carga por área e carga hidráulica. Por esse motivo, o dimensionamento e a estimativa de desempenho de filtros

percoladores realizados atualmente são baseados em relações verificadas empiricamente (METCALF & EDDY, 2016).

Dentre os métodos internacionais para o dimensionamento de filtros percoladores, foram verificadas as equações desenvolvidas pelo *National Research Council* (NRC, 1946), que determina o volume do filtro conforme a eficiência desejada para remoção de matéria orgânica; as equações de Velz (1948) e de Velz modificada (2011), que estimam a degradação da matéria orgânica; as equações de Schulze (1960) e Germain (1966), que relacionam tempo de contato, profundidade e taxa de aplicação hidráulicas; de Eckenfelder (1961) e Eckenfelder e Barnhart (1963), para estimar a eficiência; de Schroeder e Tchobanoglous (1976), para o cálculo da demanda de aeração; e as equações de Gujer & Boller (1986), para estimar a remoção de nitrogênio amoniacal; todas citadas pela literatura revisada (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO E PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016; DWA, 2016).

Há ainda outros estudos relevantes e normas, a citar WEF (1999, 2000, 2011), as normas americanas U.S. EPA 2000 “a” e “b” (2000), e a norma alemã ATV-A 281 (2001), também adotadas como referência para projetos de filtros percoladores, também citadas por Von Sperling e Chernicharo (2005), Jordão e Pessoa (2014), Metcalf & Eddy (2016) e DWA (2016).

No final da década de 70, já se estudava diferentes configurações de meio suporte plástico para filtros percoladores. A evolução destas experiências resultou na chamada “*new generation trickling filter*” ou “nova geração de filtros percoladores”, que, utilizando meio suporte plástico em substituição às pedras, objetivou superar problemas recorrentes, relacionados principalmente à colmatação do filtro e à dificuldade de manutenção, além de sugerir o aumento da capacidade de remoção de matéria orgânica e propiciar melhores condições para conversão de nitrogênio e obtenção de nitrificação parcial ou total. Os materiais plásticos utilizados como meio suporte compõem o conceito da “nova geração de filtros percoladores” e a eficiência obtida pode ser comparada a valores antes alcançados apenas em sistemas de lodos ativados ou outros processos de aeração forçada (HENRICH e MAEGGRAFF, 2013).

Estudos recentes realizados durante o projeto “*Exportorientierte Forschung und Entwicklung im Bereich Abwasser – Validierung an technischen Anlagen*” (Investigação e transferência de tecnologia orientada para o desenvolvimento do setor de águas residuárias – validação em instalações em escala industrial), promovido pela

*Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall* (Associação Alemã para Gerenciamento de Água, Águas Residuárias e Resíduos) (DWA, 2016), analisaram os métodos de dimensionamento existentes supracitados, concebidos empiricamente, normalmente em regiões temperadas. Após diversas experiências teóricas e práticas, em escala reduzida e escala operacional, realizadas em locais de diferentes regiões climáticas, a DWA (2016) apresentou um método de dimensionamento adequado não apenas a países temperados, mas sim a regiões de diferentes climas, seja em zonas temperadas, subtropicais e tropicais, conferindo a esse método uma relevância internacional (DWA, 2016).

O método internacional DWA, apresentado na publicação *“Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen”* (Dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto em Climas quentes e frios), foi estruturado a partir da modificação de equações anteriormente já utilizadas para o dimensionamento de filtros percoladores, e da combinação entre elas, e consiste no cálculo da degradação de carbono e da conversão de nitrogênio, realizado por camadas do meio suporte.

A modificação e otimização das equações conforme variações verificadas, bem como a segmentação dos cálculos de degradação de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal tornaram o dimensionamento mais preciso e fazem com que o método internacional proposto pela DWA (2016) seja adequadamente aplicado em regiões tropicais, subtropicais e temperadas, enquanto os métodos anteriores representavam de forma mais precisa o funcionamento de filtros percoladores operando em regiões temperadas, sendo necessário aplicar fatores de correção empíricos para dimensionar unidades a serem implantadas em locais com temperaturas mais elevadas (DWA, 2016).

#### 2.5.2.2 Sequência de equações sugerida por Metcalf & Eddy (2016)

Metcalf & Eddy (2016) sugere uma sequência de equações para dimensionamento de filtros percoladores, sendo que nas principais equações a remoção de DBO é relacionada à taxa de aplicação hidráulica. As equações são resultado dos trabalhos desenvolvidos por Velz (1948), que relaciona a DBO efluente com a profundidade do meio suporte, e por Schulze (1960), que apresenta uma correlação com a obtenção do tempo de detenção hidráulica no meio suporte (METCALF & EDDY, 2016).

Schulze (1960) estabeleceu uma proporção entre o tempo de contato do afluente com o biofilme, a profundidade do meio suporte e a taxa de aplicação hidráulica, conforme apresentado nas equações 4 e 5 (METCALF & EDDY, 2016).

$$t = \frac{C \cdot D}{THL^n} \quad (4)$$

$$THL = \frac{Q \cdot (1 + R)}{A} = (1 + R) \cdot q \quad (5)$$

Sendo:

- t : tempo de contato (d)
- C : constante para o meio suporte (adimensional)
- D : profundidade do meio suporte (m)
- THL : taxa de aplicação hidráulica total (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)
- n : constante hidráulica conforme características do meio suporte (adimensional)
- Q : vazão afluente (m<sup>3</sup>/d)
- R : taxa de recirculação do efluente (adimensional)
- q : taxa de aplicação hidráulica baseada na vazão afluente (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)

A variação do valor da DBO ao longo do meio suporte em função do tempo é obtida por meio da equação 6 (METCALF & EDDY, 2016).

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{\frac{-k \cdot D}{THL^n}} \quad (6)$$

Sendo:

- S<sub>e</sub> : DBO do efluente do decantador secundário (g/m<sup>3</sup>)
- S<sub>i</sub> : DBO do afluente ao filtro percolador, considerando a soma da vazão afluente e de recirculação (g/m<sup>3</sup>)
- k : constante de degradação da DBO (1/d)
- D : profundidade do meio suporte (m)
- THL : taxa de aplicação hidráulica total (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)
- n : constante hidráulica de acordo com as características do meio suporte (adimensional)

A 20 °C, os valores estimados por Schulze para  $k$  e  $n$  são 0,69 e 0,67, respectivamente (METCALF & EDDY, 2016).

Germain (1966) utilizou a Equação de Schulze para filtros percoladores com meio suporte plástico, obtendo a reação conforme equação 7 (METCALF & EDDY, 2016).

$$\frac{S_e}{S_i} = e^{\frac{-k \cdot D}{[(1+R) \cdot q]^n}} \quad (7)$$

Na prática, adota-se o valor de 0,5 para a constante hidráulica  $n$ . O valor de  $k$  é influenciado por diversos fatores, incluindo característica do afluente e parâmetros de projeto do filtro percolador e do decantador secundário, bem como das condições de operação. Assim, é proposta a equação 8 para ajuste do  $k$  em função da temperatura (METCALF & EDDY, 2016).

$$k_T = k_{20} \cdot (1,035)^{(T-20)} \quad (8)$$

Sendo:

$k_T$  : constante de degradação da DBO para a temperatura  $T$  (1/d)

$k_{20}$  : constante de degradação da DBO para a temperatura  $T$  igual a 20 °C (1/d)

$T$  : temperatura do afluente (°C)

Metcalf & Eddy (2016) cita ainda a Equação de Velz modificada (2011), equação 9, que estabelece a DBO do efluente do decantador secundário de um filtro percolador em função da DBO afluente, da taxa de recirculação, da área superficial específica e da temperatura.

$$S_e = \frac{S_o}{(R + 1) \cdot e^{\left[ \frac{k_{20} \cdot A_s \cdot D \cdot \theta^{(T-20)}}{[q(R+1)]^n} \right]} - R} \quad (9)$$

Sendo:

$S_e$  : concentração de DBO efluente do decantador secundário (g/m<sup>3</sup>)

$S_o$  : concentração de DBO afluente (g/m<sup>3</sup>)

$R$  : taxa de recirculação (adimensional)

$k_{20}$  : constante de tratamento do filtro ((l/s)<sup>0,5</sup>/m)

- $A_s$  : área superficial específica ( $m^2/m^3$ )  
 $D$  : profundidade do meio suporte (m)  
 $\theta$  : coeficiente de correção da temperatura (adimensional)  
 $T$  : temperatura do afluente ( $^{\circ}C$ )  
 $q$  : taxa de alimentação da superfície do filtro ( $m^3/(m^2 \cdot h)$ )  
 $n$  : coeficiente hidráulico (adimensional)

Para as equações de Germain e de Velz modificada supracitadas, é necessário realizar um ajuste para a constante de tratamento ou constante de tratabilidade para a profundidade do meio suporte e para a DBO afluente. O valor de  $k$  pode ser normalizado utilizando a equação 10 (WEF, 2011; METCALF & EDDY, 2016).

$$k_2 = k_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0,5} \cdot \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{0,5} \quad (10)$$

Sendo:

- $k_2$  : valor de  $k$  normalizado para a profundidade e DBO específicos (adimensional)  
 $k_1$  : valor de  $k$  para a profundidade de 6,1 m e DBO afluente igual a 150  $g/m^3$  (adimensional)  
 $D_1$  : profundidade do meio suporte (igual a 6,1 m)  
 $D_2$  : profundidade do meio suporte na condição de projeto (m)  
 $S_1$  : concentração de DBO afluente (igual a 150  $g/m^3$ )  
 $S_2$  : concentração de DBO afluente na condição de projeto ( $g/m^3$ )

A constante de tratabilidade varia em função das características do efluente a ser tratado e da área específica do meio suporte adotado. Para esgoto doméstico e para um meio suporte plástico de 100  $m^2/m^3$ , a literatura sugere o valor de 0,210 ( $l/s^{0,5}$ )/ $m^2$  (WEF, 2011; METCALF & EDDY, 2016).

Quanto ao cálculo de nitrificação, são apresentadas as equações de Daigger *et al.* (1994), WEF (2000) e Pearce e Edwards (2011).

Daigger *et al.* estabeleceram uma taxa de oxidação volumétrica em função da concentração de DBO afluente, da concentração de óxidos de nitrogênio e da vazão afluente, conforme equação 11.

$$TOV = \frac{S_0 + 4,6 (NO_x) \cdot Q}{V (10^3 \text{ g/kg})} \quad (11)$$

Sendo:

TOV : taxa de oxidação volumétrica (kg/m<sup>3</sup>·d)

So : concentração de DBO afluente (g/m<sup>3</sup>)

NOx : concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> oxidada (g/m<sup>3</sup>)

Q : vazão afluente (m<sup>3</sup>/d)

V : volume do meio suporte (m<sup>3</sup>)

WEF (2000) e Pearce e Edwards (2011) calculam a taxa específica de nitrificação a partir das taxas de aplicação superficiais determinadas para DBO e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> por meio das equações 12, 13 e 14 (METCALF & EDDY, 2016).

$$R_n = 0,82 \cdot \left( \frac{DBO}{NTK} \right)^{-0,44} \quad (12)$$

$$N_{remov} = E \cdot NTK \quad (13)$$

$$NH_{4,efluente} = 20,81 \cdot DBO^{1,03} \cdot NH_4^{1,52} \cdot Iv^{-0,36} \cdot T^{-0,12} \quad (14)$$

Sendo:

Rn : taxa específica de nitrificação (g/m<sup>2</sup>·d) (Rn ou kn)

DBO/NTK : relação entre DBO e NTK afluente (g/g)

DBO<sub>L</sub> : taxa superficial específica de aplicação de DBO (g/m<sup>2</sup>·d)

NH<sub>4L</sub> : taxa superficial específica de aplicação de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (g/m<sup>2</sup>·d)

Iv : taxa de aplicação hidráulica específica (l/m<sup>2</sup>·d)

T : temperatura do afluente (°C)

Por fim, Gujer & Boller (1986) determinam a remoção de nitrogênio amoniacal por meio da equação 15, sob influência das variações de temperatura do afluente. Quando a temperatura é inferior a 10 °C, é sugerida correção com a utilização da equação 16 (METCALF & EDDY, 2016).

$$J_{N,(z)} = J_{N,max} \cdot \left( \frac{N}{K_N + N} \right) \quad (15)$$



$$J_{N,max}(T) = J_{N,max(10)} \cdot 1,045^{(T-10)} \quad (16)$$

Sendo:

$J_{N(Z)}$  : fluxo de remoção de  $NH_4^+$  ( $g/m^2 \cdot d$ )

$J_{N,max}$  : fluxo máximo de remoção de  $NH_4^+$  na temperatura de referência T ( $g/m^2 \cdot d$ )

$N$  : concentração de  $NH_4^+$  afluyente ( $g/m^3$ )

$K_N$  : concentração de  $NH_4^+$  para a condição em que a taxa de utilização é metade da taxa específica máxima ( $g/m^3$ )

$T$  : temperatura do afluyente ( $^{\circ}C$ )

A partir de manipulações matemáticas para um balanço de massa diferencial que relaciona a variação da concentração de  $NH_4^+$  com a profundidade, obtém-se a equação 17 (METCALF & EDDY, 2016).

$$N_0 - N + K_N \cdot \ln\left(\frac{N_0}{N}\right) = \frac{Z \cdot J_{N,max}}{q} \quad (17)$$

Sendo:

$N_0$  : concentração de  $NH_4^+$  na profundidade  $Z=0$  (superfície) ( $g/m^3$ )

$N$  : concentração de  $NH_4^+$  na profundidade  $Z$  ( $g/m^3$ )

$K_N$  : concentração de  $NH_4^+$  para a condição em que a taxa de utilização é metade da taxa específica máxima ( $g/m^3$ )

$Z$  : profundidade do meio suporte (m)

$q$  : taxa de aplicação hidráulica ( $m^3/m^2 \cdot d$ )

Quando ocorre a recirculação do efluente tratado, um processo iterativo deve ser utilizado para o cálculo. Para isso, adota-se  $N_0$  como a concentração de nitrogênio amoniacal no efluente final pela equação 18. Obtido o valor de  $N_0$ , calcula-se o valor de  $N$  por meio da equação 17, anteriormente apresentada. Quando o  $N$  calculado for igual ao  $N$  adotado, encerra-se o cálculo (METCALF & EDDY, 2016).

$$N_0 = \frac{N_{afluyente} + R \cdot N}{1 + R} \quad (18)$$

Sendo:

$N_0$  : concentração de  $NH_4^+$  na profundidade  $Z=0$  (superfície) ( $g/m^3$ )

$N_{\text{afluente}}$	: concentração de $\text{NH}_4^+$ afluente ao filtro de nitrificação ( $\text{g}/\text{m}^3$ )
$R$	: taxa de recirculação do efluente tratado (adimensional)
$N$	: concentração de $\text{NH}_4^+$ na profundidade $Z$ ( $\text{g}/\text{m}^3$ )

O valor de  $q$  deve ser multiplicado pelo fator  $(1 + R)$  para que a vazão de recirculação seja considerada (METCALF & EDDY, 2016).

### 2.5.2.3 Sequência de equações sugerida por Jordão e Pessôa (2014)

A sequência de cálculo sugerida por Jordão e Pessôa (2014) determina o volume de meio suporte necessário para o filtro percolador de forma simplificada, a partir da razão entre a carga de DBO diária e a carga orgânica volumétrica em termos de DBO, em  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ .

Determinando-se a altura útil, ou altura do meio suporte, de acordo com os critérios mencionados na literatura e recomendados por norma, bem como determinando o número de unidades de filtros percoladores a implantar, tem-se a área superficial de cada filtro (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

As eficiências quanto à remoção de matéria orgânica e de matéria nitrogenada são estimadas de acordo com parâmetros de literatura, definidos teórica ou empiricamente, desenvolvidos em regiões com características climáticas temperadas, variando conforme as cargas hidráulica, orgânica e de nitrogênio aplicadas ao filtro (JORDÃO E PESSÔA, 2014; METCALF & EDDY, 2016).

A partir da carga média afluente em termos de DBO, definida pelo produto entre a vazão e a concentração de DBO, e da carga orgânica volumétrica, definida conforme o objetivo de remoção de matéria orgânica e de conversão de nitrogênio, pode-se definir o volume necessário de meio suporte, conforme as equações 19 e 20. A partir do volume total necessário e da altura definida, obedecendo os limites propostos em norma e em literatura, definem-se ou verificam-se as demais características geométricas do filtro e o número de filtros necessários, conforme as equações 21 e 22, atentando para que a taxa de aplicação hidráulica esteja dentro da faixa de valores recomendados pela literatura, conforme Tabela 6, apresentada no item 2.5.2.7 (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

$$C_{\text{afluente}} = Q_m \cdot C_{\text{DBO}} \quad (19)$$

$$V_{\text{total}} = \frac{C_{\text{afluente}}}{C_v} \quad (20)$$

$$A_{\text{Filtro}} = \frac{V_{\text{enc}}}{h_{\text{enc}}} \quad (21)$$

$$TAH_{\text{máx}} = \frac{Q_{\text{máx,afluente}}}{A_{\text{Filtro}}} \quad (22)$$

Sendo:

- $C_{\text{afluente}}$  : carga de DBO média afluente (kg/d)  
 $Q_m$  : vazão média afluente (m<sup>3</sup>/d)  
 $C_{\text{DBO}}$  : concentração de DBO (kg/m<sup>3</sup>)  
 $V_{\text{total}}$  : volume necessário para o meio suporte ou volume total (m<sup>3</sup>)  
 $C_v$  : carga orgânica volumétrica recomendada (kg/m<sup>3</sup>·dia DBO)  
 $A_{\text{Filtro}}$  : área dos filtros biológicos (m<sup>2</sup>)  
 $h_{\text{enc}}$  : altura de meio suporte do filtro (m)  
 $TAH_{\text{máx}}$  : taxa de aplicação hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·dia)  
 $Q_m$  : vazão máxima afluente (m<sup>3</sup>/d)

Jordão e Pessoa (2014) apresentam a equação 23, proposta pelo método NRC (1946), para estimar a eficiência de remoção de matéria orgânica em termos de DBO. A concentração esperada para o efluente final é posteriormente calculada a partir da equação 24.

$$E_1 = \frac{1}{[1 + 0,443 \cdot (\frac{w}{V \cdot F})^{0,5}]} \quad (23)$$

Sendo:

- $E_1$  : eficiência em termos de redução da DBO (adimensional)  
 $w$  : carga orgânica aplicada em (kg/d DBO)  
 $V$  : volume do meio suporte (m<sup>3</sup>)  
 $F$  : fator de recirculação (adimensional)

$$DBO_{\text{efluente}} = (1 - E_1) \cdot DBO_{\text{afluente}} \quad (24)$$

Sendo:

$DBO_{\text{efluente}}$  : DBO efluente (mg/l)

$E_1$  : eficiência em termos de redução da DBO (adimensional)

$DBO_{\text{afluente}}$  : DBO afluente (mg/l)

Jordão e Pessôa (2014) recomendam que caso o afluente do filtro percolador seja proveniente de reator anaeróbio, deve ser realizada uma leve aeração do afluente, antes de entrar no sistema de distribuição do filtro.

A Equação de Velz (1948), equação 25, é apresentada como a primeira relação fundamentada na biodegradabilidade. A equação relaciona a degradação da DBO em função da profundidade do meio suporte e da taxa K de reação, sendo que é adotado 0,150 para filtros percoladores de alta taxa e 0,175 para baixa taxa (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

$$\frac{L_D}{L_o} = 10^{(-K \cdot D)} \quad (25)$$

Sendo:

$L_D$  : DBO efluente (mg/l)

$L_o$  : DBO afluente (mg/l)

$K$  : constante da reação (1/d)

$D$  : profundidade do meio suporte (m)

Já o Critério de Eckenfelder (1960) relacionou a remoção de DBO com a profundidade do meio suporte e com a carga hidráulica aplicada por meio da equação 26 (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

$$\frac{S_e}{S_o} = e^{\frac{-K \cdot D}{Q^n}} \quad (26)$$

Sendo:

$S_e$  : concentração da DBO efluente (mg/l)

$S_o$  : concentração da DBO afluente (mg/l)

$K$  : coeficiente do material utilizado como meio suporte (adimensional)

$D$  : profundidade do meio suporte (m)

$Q$  : carga hidráulica aplicada ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )

$n$  : constante em função do meio suporte e da superfície específica (0,2 a 1,1)

Para os casos em que se deseja remover nitrogênio amoniacal, é proposta a utilização das equações 27 e 28, adaptando a taxa de nitrificação de 1,086 utilizada em climas mais frios, determinada por WEF (2000), multiplicando o valor da equação por um coeficiente de segurança de 0,75, resultando na equação 29.

$$k_n = 1,086 \cdot \left( \frac{\text{DBO}}{\text{NTK}} \right)^{-0,44} \quad (27)$$

$$k_n = 0,75 \cdot 1,086 \cdot \left( \frac{\text{DBO}}{\text{NTK}} \right)^{-0,44} \quad (28)$$

$$k_n = 0,82 \cdot \left( \frac{\text{DBO}}{\text{NTK}} \right)^{-0,44} \quad (29)$$

Sendo:

$K_n$  : taxa de nitrificação ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{d N}$ )

$\text{DBO}$  : concentração de DBO ( $\text{mg}/\text{l}$ )

$\text{NTK}$  : concentração NTK ( $\text{mg}/\text{l}$ )

Para determinar a massa removida de nitrogênio em função da eficiência  $E$ , é apresentada a equação 30. A sequência de cálculo considera a área superficial específica do material utilizado como meio suporte na equação 31, calculando a área total de contato, produto da massa de NTK removida diariamente pela taxa de nitrificação calculada. Sabendo a área de contato total necessária e a área superficial específica do meio suporte a ser utilizado, estima-se o volume total necessário para o filtro percolador para realizar nitrificação, o número de unidades e as demais características geométricas dos filtros por meio das equações 32 e 33. As verificações dos cálculos podem ser realizadas utilizando a concentração de DBO, a taxa volumétrica de DBO e o volume do meio suporte, conforme as equações 34, 35 e 36.

$$N_{\text{remov}} = E \cdot NTK \quad (30)$$

$$A_{\text{cont}} = \frac{N_{\text{remov}}}{K_n} \quad (31)$$

$$V_{\text{ench}} = \frac{A_{\text{cont}}}{A_{\text{esp}}} \quad (32)$$

$$A_{\text{Filtro}} = \frac{V_{\text{ench}}}{h_{\text{ench}}} \quad (33)$$

$$TV_{\text{DBO}} = \frac{C_{\text{DBO}}}{V_{\text{ench}}} \quad (34)$$

$$TA_{\text{DBO}} = \frac{C_{\text{DBO}}}{A_{\text{cont}}} \quad (35)$$

$$TAH_{\text{máx}} = \frac{Q_m}{A_{\text{Filtro}}} \quad (36)$$

Sendo:

$N_{\text{remov}}$	: concentração ou massa de nitrogênio removida (mg/l) (kg/d)
$E$	: eficiência de remoção de nitrogênio (%)
$NTK$	: concentração ou carga de nitrogênio afluente (mg/l) (kg/d)
$A_{\text{cont}}$	: área superficial específica total necessária (m <sup>2</sup> )
$K_n$	: taxa de nitrificação (g/m <sup>2</sup> ·d N)
$Q_m$	: vazão média afluente (m <sup>3</sup> /d)
$C_{\text{DBO}}$	: concentração de DBO (kg/m <sup>3</sup> )
$V_{\text{ench}}$	: volume necessário de meio suporte (m <sup>3</sup> )
$A_{\text{esp}}$	: área superficial específica do meio suporte (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
$A_{\text{Filtro}}$	: área dos filtros (m <sup>2</sup> )
$h_{\text{enc}}$	: altura de meio suporte do filtro (m)
$TV_{\text{DBO}}$	: taxa volumétrica de DBO (kg/m <sup>3</sup> ·dia DBO)
$TA_{\text{DBO}}$	: taxa DBO por área superficial de contato (g/m <sup>2</sup> ·dia DBO)
$TAH_{\text{máx}}$	: taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·dia)

#### 2.5.2.4 Sequência de equações do método internacional proposta pela DWA (2016)

A sequência de cálculos proposta pelo método internacional DWA (2016) permite determinar a degradação da matéria orgânica e do nitrogênio amoniacal ao longo da altura do filtro, de forma segmentada, através da Equação de Velz, utilizada

com algumas modificações se comparada à Equação de Velz proposta em 1986, e da Equação de Gujer & Boller (DWA, 2016).

A sequência do dimensionamento é dividida em etapas, conforme as fases de degradação biológica. A primeira fase ocorre nas camadas mais superiores do filtro e é caracterizada pela atividade heterotrófica, ocorrendo principalmente a redução de matéria orgânica ou carbonácea (DWA, 2016).

Na sequência, há uma fase intermediária, chamada de fase de transição, em que ocorre a diminuição das bactérias heterotróficas enquanto verifica-se o aumento da presença de bactérias autotróficas (DWA, 2016).

Por fim, nas camadas mais inferiores do filtro, predomina a atividade autotrófica e ocorre a nitrificação de forma predominante. Para cada uma destas fases são aplicadas equações específicas para remoção de matéria orgânica e conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato. O método definiu ainda uma equação para estimar a incorporação de nitrogênio amoniacal à biomassa ao longo de toda a profundidade do filtro (DWA, 2016).

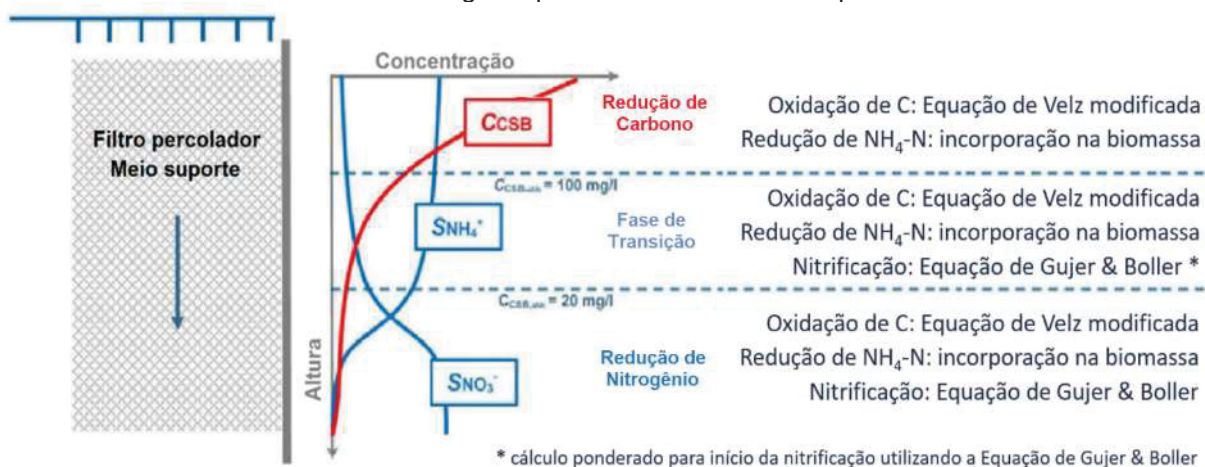
O método internacional proposto pela DWA (2016) calcula a degradação da matéria orgânica e a conversão do nitrogênio, aplicando as equações ao longo da profundidade do filtro, segmento a segmento, sendo cada segmento de 10 cm. Para cada segmento, calcula-se, portanto, as concentrações efluentes de DQO e de  $\text{NH}_4^+$ , até obter a altura previamente determinada ou até atingir a eficiência desejada (DWA, 2016).

Na Figura 11 é apresentada uma ilustração das fases de degradação biológica da matéria orgânica e de conversão do nitrogênio, com redução de nitrogênio amoniacal, que regem o princípio do método internacional DWA (2016) para dimensionamento de filtros percoladores, estabelecendo um perfil de decaimento de carbono e nitrogênio amoniacal ao longo da profundidade do filtro, bem como estabelecendo a formação de nitrato, produto da nitrificação (DWA, 2016).

Já na Figura 12 verifica-se uma ilustração do princípio do método de cálculo segmentado proposto pela DWA (2016), enfatizando que para cada segmento de meio suporte, é realizado o cálculo de afluente e efluente conforme as equações sugeridas (DWA, 2016).



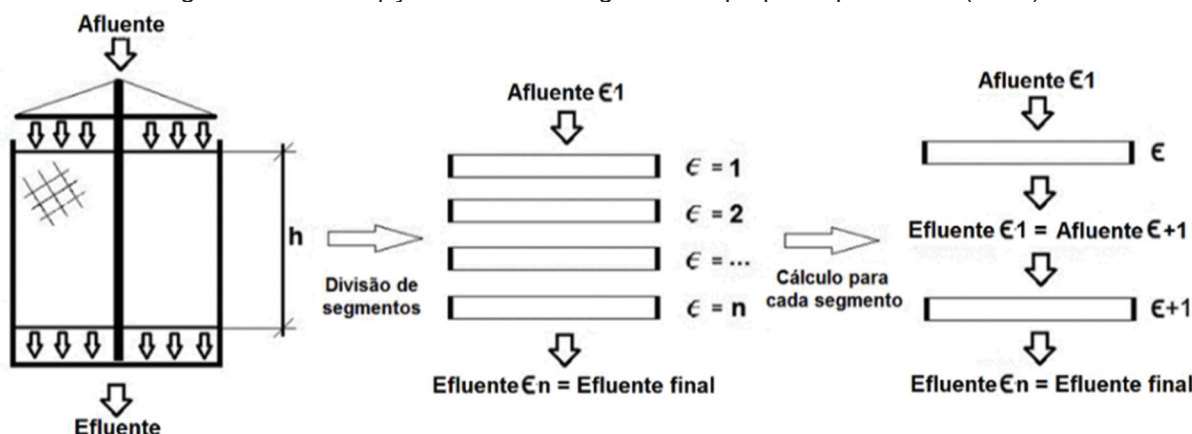
Figura 11 – Perfil de oxidação de carbono C e de conversão de nitrogênio amoniacal  $\text{NH}_4^+$  em nitrato  $\text{NO}_3^-$  ao longo da profundidade de um filtro percolador



FONTE: Adaptado de DWA (2016).

**Notas:** <sup>(1)</sup>  $\text{CCSB}$  é a concentração de DQO, para amostra homogeneizada, em mg/l. <sup>(2)</sup>  $\text{SNH}_4^+$  e  $\text{SNO}_3^-$  são as concentrações de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ , respectivamente, para amostra homogeneizada filtrada a  $0,45 \mu\text{m}$ .

Figura 12 – Concepção de cálculo segmentado proposto pela DWA (2016)



FONTE: Adaptado de DWA (2016).

Para determinar a degradação de carbono, a sequência de cálculo proposta pela DWA utiliza a Equação de Velz modificada e adaptada anteriormente citada. Considerando que a degradação ocorre em intensidades diferentes ao longo de todo o filtro, esta Equação é aplicada nas três etapas de cálculo estabelecidas pela DWA, determinando a oxidação do carbono ao longo de toda a profundidade do filtro, segmento por segmento.

A modificação realizada para esta equação é principalmente relacionada à segmentação do cálculo, à utilização de um algoritmo com cálculo iterativo, à utilização da DQO, e não mais da DBO, como era originalmente calculada, à correção de coeficientes relacionados à temperatura e à ponderação do fator “*patchy*” referente à uniformidade de crescimento do biofilme, tornando o método adequado à aplicação

em locais com diferentes condições climáticas, representando vantagens práticas em relação à determinação da DQO afluente e efluente se comparada à DBO (DWA, 2016). A Equação de Velz modificada considera a área superficial específica do meio suporte, um coeficiente de tratabilidade, a temperatura e um fator de correção para a temperatura, a taxa de aplicação hidráulica do afluente e a realização do cálculo de forma iterativa, por camadas ou segmentos do filtro (DWA, 2016), conforme a equação 37.

$$S_{DQO, \text{efluente}} \text{ €} = \frac{S_{DQO, \text{afluente}} \text{ €}}{e^{\frac{A_{\text{esp}} \cdot k_{20} \cdot \theta_{C, 20^{\circ}\text{C}}^{(T-20)} \cdot h_{\text{€}}}{q_A^n}}} \quad (37)$$

Sendo:

€ : segmento do filtro percolador a ser calculado (m)

$S_{DQO, \text{efluente}} \text{ €}$  : concentração de DQO do efluente do segmento € (mg/l)

$S_{DQO, \text{afluente}} \text{ €}$  : concentração de DQO do afluente do segmento € (mg/l)

$A_{\text{esp}}$  : área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )

$k_{20}$  : coeficiente de tratabilidade ( $(\text{m}^3/(\text{h} \cdot \text{m}^2))^n$ )

$\theta_{C, x^{\circ}\text{C}}$  : fator de correção da temperatura (adimensional)

$T$  : temperatura do afluente ( $^{\circ}\text{C}$ )

$h_{\text{€}}$  : altura do segmento € (m)

$q_A$  : taxa de alimentação da superfície do filtro ( $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ )

$n$  : coeficiente hidráulico (adimensional)

O coeficiente de correção de temperatura  $\theta_{C, x^{\circ}\text{C}}$  adotado no método internacional proposto pela DWA (2016) é 1,03. O coeficiente hidráulico  $n$  é definido em função da área específica  $A_{\text{esp}}$ , sendo definido pelo fabricante do meio suporte plástico ou geralmente adotado o valor igual a 0,5 (DWA, 2016; PARKER & MERRIL, 1984).

Quanto à elaboração de uma equação para quantificar a porção de nitrogênio amoniacal incorporado à biomassa, a DWA (2016) sugere uma relação de 0,01 g  $\text{NH}_4^+$  para cada 1 g de DQO degradada. Essa relação é exposta através da equação 38 e se aplica às três fases de cálculo estabelecidas ao longo da profundidade do filtro percolador (DWA, 2016).

$$\Delta S_{NH_4, \epsilon} = (S_{DQO, \text{afluente } \epsilon} - S_{DQO, \text{efluente } \epsilon}) \cdot 0,01 \quad (38)$$

Sendo:

$\Delta S_{NH_4, \epsilon}$  : diferença entre as concentrações de  $NH_4^+$  afluyente e efluente ao segmento  $\epsilon$  (mg/l)

$S_{DQO, \text{afluente } \epsilon}$  : concentração de DQO na entrada do segmento  $\epsilon$  (mg/l)

$S_{DQO, \text{efluente } \epsilon}$  : concentração de DQO na saída do segmento  $\epsilon$  (mg/l)

Para cargas de DQO superiores a 6,0 kg/m<sup>3</sup>·d, a partir de experimentos realizados, a DWA (2016) recomenda que sejam estabelecidos novos métodos e parâmetros de cálculo por meio de experimentos em plantas de escala reduzida, bem como para obter taxas de degradação mais precisas para estes casos de cargas elevadas.

Na sequência, a partir da fase de transição, é realizado um cálculo de nitrificação por meio da Equação de Gujer & Boller, inicialmente utilizando um fator de ponderação conforme a equação 39, considerando que nessa fase ainda ocorre ação e interferência da atividade heterotrófica sobre a atividade autotrófica de nitrificação, conforme ilustrado na Figura 11. O fator de ponderação é definido a partir da concentração de DQO do segmento  $\epsilon$  anterior, ou seja, da DQO afluyente ao segmento objeto de cálculo, e aplicável apenas à fase de transição, multiplicando o fator de ponderação ao resultado obtido na Equação de Gujer e Boller, ou seja, na sequência de cálculos de iteração, segmento a segmento do filtro, enquanto a DQO estiver entre 100 e 20 mg/l. A partir do segmento em que o efluente atinge 20 mg/l de DQO, onde já é predominante a atuação das bactérias autotróficas, ou seja, onde ocorre a nitrificação sem interferência significativa das bactérias heterotróficas, é aplicada então apenas a Equação original de Gujer e Boller, conforme as equações 40 e 41 (DWA, 2016).

$$p = \left( 100 - \frac{S_{DQO, \text{afluente } \epsilon}}{80} \right)^3 \quad (39)$$

$$\Delta S_{NH_4, \epsilon} = \frac{A_{esp}}{q_A \cdot 24} \cdot j_{N, \max} (10) \cdot \theta_{N, 10^\circ C}^{(T - 10)} \cdot \frac{S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}}{N + S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}} \cdot e^{(-k \cdot hv)} \quad (40)$$

$$S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon} = S_{NH_4, \text{efluente } \epsilon} + \Delta S_{NH_4, \epsilon} \cdot h_\epsilon \quad (41)$$

Sendo:

- $p$  : fator de ponderação para a fase de transição (adimensional)
- $S_{DQO, \text{afluente } \epsilon}$  : concentração de DQO do afluente do segmento  $\epsilon$  (mg/l)
- $\Delta S_{NH_4, \epsilon}$  : diferença entre as concentrações de  $NH_4^+$  afluente e efluente ao segmento  $\epsilon$  (mg/l)
- $q_A$  : taxa de alimentação da superfície do filtro ( $m^3/(m^2 \cdot h)$ )
- $j_{N, \max} (10)$  : nitrificação máxima por área à  $T = 10^\circ C$  ( $gN/(m^2 \cdot d)$ )
- $\theta_C, ^\circ C$  : fator de correção da temperatura (adimensional)
- $T$  : temperatura do afluente ( $^\circ C$ )
- $S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}$  : concentração de  $NH_4^+$  afluente ao segmento  $\epsilon$  (mg/l)
- $k$  : fator de “*patchy*” de crescimento do biofilme (adimensional)
- $h_v$  : distância vertical do segmento  $\epsilon$  até a superfície do filtro (m)
- $N$  : fator de saturação de  $NH_4^+$  (mg/l)

A concentração de amônia no efluente final de cada segmento calculado é obtida, então, considerando a incorporação do  $NH_4^+$  na biomassa ao longo de toda a profundidade do filtro, somada ao cálculo da nitrificação ponderada nos segmentos entre 100 e 20 mg/l de DQO e da nitrificação a partir de 20 mg/l, conforme as equações 39, 40 e 41, resultando na equação 42 (DWA, 2016).

$$S_{NH_4, \text{efluente } \epsilon} = S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon} + \Delta S_{NH_4, \epsilon} \cdot h_{\epsilon} - (S_{CSB, \text{afluente } \epsilon} - S_{CSB, \text{efluente } \epsilon}) \cdot 0,01 \quad (42)$$

A taxa máxima de nitrificação a  $10^\circ C$  é fixada conforme a disponibilidade de substrato suficiente nas camadas superiores do filtro percolador, podendo ser aplicado com  $1,8 g/(m^2 \cdot d)$  de nitrogênio. A DWA (2016) observa que outros valores podem ser atribuídos caso sejam feitos experimentos ou plantas de escala reduzida para definir variações (DWA, 2016).

Quanto ao fator de saturação  $N$ , este considera a influência da concentração do substrato no meio suporte na taxa de metabolismo. Para as bactérias que realizam a oxidação da amônia, a concentração de nitrogênio amoniacal  $NH_4^+$  deve estar entre 1 e 2 mg/l (DWA, 2016).

Quanto ao fator de correção da temperatura, foi definido e validado como igual a 1,02, a partir de estudos e experimentos realizados por Henrich & Seeger (2016), recomendado pela DWA (2016).

Por fim, a equação considera o fator “*patchy*”, relacionado ao preenchimento não homogêneo do biofilme sobre a superfície do meio suporte ao longo da profundidade do filtro, o que sugere uma redução da nitrificação nestas áreas, atribuindo para  $k$  o valor igual a 0,11 (DWA, 2016).

Assim, o método internacional proposto pela DWA (2016) utiliza as equações supracitadas de acordo com as reações biológicas que ocorrem ao longo da profundidade do filtro. A degradação de carbono para toda a profundidade, assim como a quantificação de incorporação de nitrogênio amoniacal à biomassa. Já as equações relacionadas à remoção de nitrogênio amoniacal são, por sua vez, utilizadas apenas a partir do segmento do filtro em que é verificada DQO inferior a 100 mg/l, quando as condições se tornam favoráveis para o início da nitrificação, sendo que entre 100 e 20 mg/l é empregado um fator de ponderação sobre a equação principal, considerando a inibição da nitrificação em função da influência das bactérias heterotróficas sobre as autotróficas (DWA, 2016).

A DWA (2016) recomenda ainda a complementação dos cálculos com um fator de segurança que adiciona 5 % do valor de volume útil calculado a fim de que o processo não seja prejudicado em eventos de pico hidráulico.

#### 2.5.2.5 Compilação das equações de dimensionamento de filtros percoladores

Este item apresenta todas as equações levantadas nos itens 2.5.2.2, 2.5.2.3 e 2.5.2.4, reunidas conforme os objetivos de tratamento do filtro, ou seja, degradação de carbono e conversão de nitrogênio.

No Quadro 2 estão organizadas as equações relacionadas ao dimensionamento de filtros percoladores objetivando à degradação de matéria orgânica ou carbono, enquanto no Quadro 3, estão organizadas as equações relacionadas ao dimensionamento de filtros percoladores que objetivam à remoção de nitrogênio amoniacal, facilitando a comparação entre as variáveis utilizadas.

Quadro 2 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a degradação de carbono

Equações e variáveis relacionadas à degradação de carbono		
	Equações propostas	Variáveis relacionadas
NRC (1946)	$E_1 = \frac{1}{\left[ (1 + 0,443) \cdot \left( \frac{W}{V \cdot F} \right)^{0,5} \right]}$ $DBO_{\text{efluente}} = (1 - E_1) \cdot DBO_{\text{afluente}}$	<p><math>E_1</math>: eficiência em termos de redução da DBO (adimensional)  <math>w</math>: carga orgânica aplicada em (kg/d DBO)  <math>V</math>: volume do meio suporte (<math>m^3</math>)  <math>F</math>: fator de recirculação (adimensional)  <math>DBO_{\text{efl}}</math>: DBO efluente (mg/l)  <math>DBO_{\text{afl}}</math>: DBO afluyente (mg/l)</p>
Velz (1948)	$\frac{L_D}{L_0} = 10 (-K \cdot D)$	<p><math>L_D</math>: DBO efluente (mg/l)  <math>L_0</math>: DBO afluyente (mg/l)  <math>K</math>: constante da reação (1/d)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)</p>
Eckenfelder (1963)	$\frac{S_e}{S_0} = e^{-K \left( \frac{D}{Q^n} \right)}$	<p><math>S_e</math>: concentração de DBO efluente do decantador secundário (<math>g/m^3</math>)  <math>S_0</math>: concentração de DBO afluyente (<math>g/m^3</math>)  <math>K</math>: constante da reação (1/d)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)</p>
Schulze (1960)	$t = \frac{C \cdot D}{THL^n}$ $THL = \frac{Q(1 + R)}{A} = (1 + R) q$	<p><math>t</math>: tempo de contato (d)  <math>C</math>: constante para o meio suporte (adimensional)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)  <math>THL</math>: taxa de aplicação hidráulica total (<math>m^3/m^2 \cdot d</math>)  <math>n</math>: constante hidráulica de acordo com as características do meio suporte (adimensional)  <math>Q</math>: vazão (<math>m^3/d</math>)  <math>A</math>: área superficial do filtro (<math>m^2</math>)  <math>R</math>: taxa de recirculação do efluente (adimensional)  <math>q</math>: taxa de aplicação hidráulica baseada na vazão afluyente (<math>m^3/m^2 \cdot d</math>)</p>
Schulze (1960)	$\frac{S_e}{S_i} = e^{\frac{-k \cdot D}{THL^n}}$	<p><math>S_e</math>: DBO do efluente do decantador secundário (<math>g/m^3</math>)  <math>S_i</math>: DBO do afluyente ao filtro percolador, considerando a soma da vazão afluyente e de recirculação (<math>g/m^3</math>)  <math>k</math>: constante de degradação da DBO (1/d)  <math>T</math>: temperatura do afluyente (<math>^{\circ}C</math>)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)  <math>THL</math>: taxa de aplicação hidráulica total (<math>m^3/m^2 \cdot d</math>)</p>
Germain (1966)	$\frac{S_e}{S_i} = e^{\frac{-k \cdot D}{[(1+R) \cdot q]^n}}$ $k_T = k_{20} (1,035)^{(T-20)}$	<p><math>S_e</math>: concentração da DBO efluente (mg/l)  <math>S_0</math>: concentração da DBO afluyente (mg/l)  <math>k</math>: coeficiente do material utilizado como meio suporte (adimensional)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)  <math>R</math>: taxa de recirculação do efluente (adimensional)  <math>q</math>: taxa de aplicação hidráulica baseada na vazão afluyente (<math>m^3/m^2 \cdot d</math>)  <math>n</math>: constante hidráulica de acordo com as características do meio suporte (adimensional)</p>

Quadro 2 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a degradação de carbono (continuação)

Equações e variáveis relacionadas à degradação de carbono (continuação)		
	Equações propostas	Variáveis relacionadas
Geometria	$C_{\text{afluente}} = Q_m \cdot C_{\text{DBO}}$ $V_{\text{total}} = \frac{C_{\text{afluente}}}{C_v}$ $A_{\text{Filtro}} = \frac{V_{\text{total}}}{h_{\text{util}}}$ $TAH_{\text{máx}} = \frac{Q_{\text{máx, afluente}}}{A_{\text{Filtro}}}$	<p><math>C_{\text{afluente}}</math>: carga DBO média afluente (kg/d)  <math>Q_m</math>: vazão média afluente (m³/d)  <math>C_{\text{DBO}}</math>: concentração de DBO (kg/m³)  <math>V_{\text{total}}</math>: volume total do meio suporte (m³)  <math>C_v</math>: carga orgânica volumétrica (kg/m³·d DBO)  <math>A_{\text{Filtro}}</math>: área dos filtros biológicos (m²)  <math>h_{\text{util}}</math>: altura de meio suporte do filtro (m)  <math>TAH_{\text{máx}}</math>: taxa de aplicação Hidráulica (m³/m²·d)  <math>Q_{\text{máx, afluente}}</math>: vazão máxima afluente (m³/d)</p>
Velz modificada (WEF, 2011)	$S_e = \frac{S_o}{(R + 1) \cdot e^{\left[ \frac{k_{20} \cdot A_s \cdot D \cdot \theta^{(T-20)}}{[q(R+1)]^n} \right]} - R}$ $k_2 = k_1 \left( \frac{D_1}{D_2} \right)^{0,5} \left( \frac{S_1}{S_2} \right)^{0,5}$	<p><math>S_e</math>: concentração de DBO efluente do decantador secundário (g/m³)  <math>S_o</math>: concentração de DBO afluente (g/m³)  <math>k_{20}</math>: constante de tratamento do filtro ((l/s)<sup>0,5</sup>/m) (profundidade de 6,1 m e DBO afluente igual a 150 g/m³)  <math>A_s</math>: área superficial específica (m²/m³)  <math>D</math>: profundidade do meio suporte (m)  <math>\theta</math>: coeficiente de correção da temperatura  <math>T</math>: temperatura do esgoto (°C)  <math>q</math>: taxa de alimentação da superfície do filtro (m³/(m²·h))  <math>n</math>: coeficiente hidráulico (adimensional)  <math>R</math>: taxa de recirculação (adimensional)  <math>k_2</math>: valor de k normalizado para a profundidade e DBO específicos (adimensional)  <math>k_1</math>: valor de k para profundidade = 6,1 m e DBO<sub>afluente</sub> = 150 g/m³  <math>D_1</math>: profundidade meio suporte = 6,1 m  <math>D_2</math>: profundidade do meio suporte na condição de projeto (m)  <math>S_1</math>: DBO = 150 g/m³  <math>S_2</math>: DBO afluente na condição de projeto (g/m³)</p>
Velz modificada (DWA, 2016)	$S_{\text{DQO, efluente } \epsilon} = \frac{SDQO_{\text{afluente } \epsilon}}{e^{\frac{A_{\text{esp}} \cdot k_{20} \cdot \theta_{C, 20^\circ C} (T - 20) \cdot h_{\epsilon}}{q_A^n}}}$	<p><math>\epsilon</math>: segmento do filtro percolador a ser calculado (m)  <math>SDQO_{\text{efluente } \epsilon}</math>: concentração de DQO do efluente do segmento <math>\epsilon</math> (mg/l)  <math>SDQO_{\text{afluente } \epsilon}</math>: concentração de DQO do afluente do segmento <math>\epsilon</math> (mg/l)  <math>A_{\text{esp}}</math>: área superficial específica (m²/m³)  <math>k_{20}</math>: coeficiente de tratabilidade ((m³/(h·m²))<sup>n</sup>)  <math>\theta_{C, x^\circ C}</math>: fator de correção da temperatura (adimensional)  <math>T</math>: temperatura do esgoto (°C)  <math>h_{\epsilon}</math>: altura do segmento <math>\epsilon</math> (m)  <math>q_A</math>: taxa de alimentação da superfície do filtro (m³/(m²·h))  <math>n</math>: coeficiente hidráulico (adimensional)</p>

FONTE: Adaptado de DWA (2016), Metcalf &amp; Eddy (2016) e Jordão e Pessoa (2014).



Quadro 3 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a conversão de nitrogênio

Equações e variáveis relacionadas à conversão de nitrogênio		
	Equações propostas	Variáveis relacionadas
Daigger (1994)	$TOV = \frac{S_o + 4,6 (NO_x) \cdot Q}{V (10^3 \text{ g/kg})}$	TOV: taxa de oxidação volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d) So: concentração de DBO afluente (g/m <sup>3</sup> ) NOx: concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> oxidada (g/m <sup>3</sup> ) Q: vazão afluente (m <sup>3</sup> /d) V: volume do meio suporte (m <sup>3</sup> )
WEF (2000)	$R_n = 0,82 \cdot \left( \frac{DBO}{NTK} \right)^{-0,44}$ $N_{\text{remov}} = E \cdot NTK$	Rn: taxa específica de nitrificação (g/m <sup>2</sup> ·d) (Rn ou kn)
Peace e Edwards (2011)	$NH_{4,\text{efluente}} = 20,81 \cdot DBO^{1,03} \cdot NH_4^{1,52} \cdot Iv^{-0,36} \cdot T^{-0,12}$	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , efluente: concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> do efluente (g/m <sup>3</sup> ) DBO <sub>L</sub> : taxa superficial específica de aplicação de DBO (g/m <sup>2</sup> ·d) NH <sub>4L</sub> : taxa superficial específica de aplicação de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/m <sup>2</sup> ·d) Iv: taxa de aplicação hidráulica específica (l/m <sup>2</sup> ·d) T: temperatura do afluente (°C)
Gujer & Boller (1986)	$J_{N,(Z)} = J_{N,\text{max}} \cdot \left( \frac{N}{K_N + N} \right)$ $J_{N,\text{max}}(T) = J_{N,\text{max}}(10) \cdot (1,045^{(T-10)})$ $N_0 - N_Z + K_N \cdot \ln \left( \frac{N_0}{N} \right) = \frac{Z_a \cdot J_{N,\text{max}}}{q}$ $N_0 = \frac{N_{\text{afluente}} + RN}{1 + R}$	J <sub>N(Z)</sub> : fluxo de remoção de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (g/m <sup>2</sup> ·d) J <sub>N,max</sub> : fluxo máximo de remoção de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> na temperatura de referência T (g/m <sup>2</sup> ·d) N: concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> afluente (g/m <sup>3</sup> ) K <sub>N</sub> : concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> para a condição em que a taxa de utilização é metade da taxa específica máxima (g/m <sup>3</sup> ) Z: profundidade do meio suporte (m) N <sub>Z</sub> : concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> na profundidade Z (g/m <sup>3</sup> ) N <sub>0</sub> : concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> na profundidade Z=0 (superfície) (g/m <sup>3</sup> ) q: taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d) N <sub>afluente</sub> : concentração de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> afluente ao filtro de nitrificação (g/m <sup>3</sup> ) R: taxa de recirculação do efluente tratado (adimensional)
Geometria	$A_{\text{cont}} = \frac{N_{\text{remov}}}{k_n}$ $V_{\text{ench}} = \frac{A_{\text{cont}}}{A_{\text{esp}}}$ $A_{\text{Filtro}} = \frac{V_{\text{ench}}}{h_{\text{ench}}}$ $TV_{\text{DBO}} = \frac{C_{\text{DBO}}}{V_{\text{ench}}}$ $TA_{\text{DBO}} = \frac{C_{\text{DBO}}}{A_{\text{cont}}}$ $TAH_{\text{máx}} = \frac{Q_m}{A_{\text{Filtro}}}$	A <sub>cont</sub> : área superficial total de contato (m <sup>2</sup> ) N <sub>remov</sub> : concentração ou massa de nitrogênio removida (mg/l) (kg/d) k <sub>n</sub> : taxa de nitrificação (g/m <sup>2</sup> ·d N) Q <sub>m</sub> : vazão média afluente (m <sup>3</sup> /d) C <sub>DBO</sub> : concentração de DBO (kg/m <sup>3</sup> ) V <sub>ench</sub> : volume do meio suporte (m <sup>3</sup> ) A <sub>Filtro</sub> : área dos filtros (m <sup>2</sup> ) h <sub>ench</sub> : altura de meio suporte do filtro (m) TV <sub>DBO</sub> : taxa volumétrica de DBO (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO) TA <sub>DBO</sub> : taxa DBO por área superficial de contato (g/m <sup>2</sup> ·d) TAH <sub>máx</sub> : taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)

Quadro 3 – Equações e variáveis utilizadas para estimar a conversão de nitrogênio (continuação)

Equações e variáveis relacionadas à conversão de nitrogênio (continuação)		
	Equações propostas	Variáveis relacionadas
Incorporação (DWA, 2016)	$\Delta S_{NH_4, \epsilon} = (S_{DQO, \text{afluente } \epsilon} - S_{DQO, \text{efluente } \epsilon}) \cdot 0,01$	$\Delta S_{NH_4, \epsilon}$ : diferença entre as concentrações de $NH_4^+$ na entrada e na saída do segmento $\epsilon$ (mg/l) $S_{NH_4, \text{efluente } \epsilon}$ : concentração de $NH_4^+$ na saída do segmento $\epsilon$ (mg/l) $S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}$ : concentração de $NH_4^+$ na entrada do segmento $\epsilon$ (mg/l)
Gujer & Bollor modificada (DWA, 2016)	$\Delta S_{NH_4, \epsilon} = \frac{A_{esp}}{q_A \cdot 24} \cdot j_{N, \max} (10) \cdot \theta_{N, 10^\circ C}^{(T - 10)} \cdot \frac{S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}}{N + S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon}} \cdot e^{(-k \cdot h_v)}$ $p = \left( \frac{100 - S_{DQO, \text{afluente}}}{80} \right)^3$ $S_{NH_4, \text{afluente } \epsilon} = S_{NH_4, \text{efluente } \epsilon} + \Delta S_{NH_4, \epsilon} \cdot h_\epsilon$	$\Delta S_{NH_4, \epsilon}$ : diferença entre as concentrações de $NH_4^+$ na entrada e na saída do segmento $\epsilon$ (mg/l) $A_{esp}$ : área superficial específica do meio suporte utilizado ( $m^2/m^3$ ) $j_{N, \max} (10)$ : nitrificação máxima por área à $T_w = 10^\circ C$ ( $gN/(m^2 \cdot d)$ ) $N$ : fator de saturação de $NH_4^+$ (mg/l) $k$ : fator de “ <i>patchy</i> ” de crescimento do biofilme (adimensional) $h_v$ : distância vertical do segmento $\epsilon$ até a superfície do filtro (m)

FONTE: Adaptado de DWA (2016), Metcalf & Eddy (2016) e Jordão e Pessoa (2014).

### 2.5.2.6 Taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica

A taxa de aplicação hidráulica representa qual a vazão afluente aplicada ao longo da superfície livre do meio suporte (PROSAB, 2001). A taxa de aplicação hidráulica é obtida conforme equação 43.

$$TAH = \frac{Q}{A} \quad (43)$$

Sendo:

TAH : taxa de aplicação hidráulica ou carga hidráulica ( $m^3/m^2 \cdot d$ )

Q : vazão afluente ao filtro percolador ( $m^3/d$ )

A : área superficial livre do meio suporte ( $m^2$ )

A taxa de aplicação hidráulica controla a umidade do sistema, a espessura do biofilme, possíveis odores causados por biofilme seco e reações anaeróbias não desejadas, além da presença de moscas e outros vetores. A variação da taxa de aplicação hidráulica influencia diretamente a velocidade de rotação do sistema de

distribuição, o potencial de secagem do biofilme, o arraste de sólidos e a eficiência do tratamento (METCALF & EDDY, 2016).

Já a carga orgânica volumétrica representa a quantidade de matéria orgânica aplicada diariamente ao volume do meio suporte (PROSAB, 2001). A carga orgânica volumétrica é obtida conforme equação 44.

$$Cv = \frac{Q_{med} \cdot Sa}{V} \quad (44)$$

Sendo:

Cv : carga orgânica volumétrica (kg/m<sup>3</sup>·d)

Q : vazão afluente ao filtro percolador (m<sup>3</sup>/d)

A : carga de DBO afluente ao filtro percolador (kg/m<sup>3</sup>)

V : volume total do meio suporte (m<sup>3</sup>)

A taxa de alimentação hidráulica e de carga orgânica do filtro percolador deve ser suficiente para garantir que toda a área superficial específica do meio suporte seja irrigada, ou seja, deve-se garantir a eficiência de molhamento da superfície disponível para fixação da biomassa, fator essencial para o bom desenvolvimento do biofilme e para a obtenção da eficiência do tratamento (DWA, 2016).

A taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica aplicadas variam conforme o objetivo do filtro, quanto à remoção de matéria orgânica e quanto à necessidade de nitrificação, sendo as taxas e cargas mais elevadas aplicadas em filtros de alta taxa, para remoção de carbono, e taxas e cargas reduzidas aplicadas quando se deseja realizar a remoção de carbono e a nitrificação no mesmo filtro percolador, conforme mostrado na Tabela 6, item 2.5.2.7.

A alimentação hidráulica do filtro pode sofrer pequenas variações, porém estas devem ser de duração curta suficiente para que o biofilme não fique seco. A recirculação é necessária para que a umidade do biofilme seja assegurada, especialmente nos horários de baixa vazão afluente à ETE (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Os itens 2.5.2.11 e 2.5.2.16 tratam sobre o crescimento do biofilme e sobre a prática da recirculação na operação de filtros percoladores.

### 2.5.2.7 Critérios e parâmetros de dimensionamento sugeridos na literatura

As diferenças entre filtros percoladores de alta e baixa taxa hidráulica e de alta e baixa carga orgânica volumétrica com pedra brita ou com plástico incluem parâmetros de projeto, taxas de operação e objetivos do filtro quanto à degradação de matéria orgânica e à obtenção de nitrificação. Na Tabela 6 estão apresentados tais parâmetros e reunidas as faixas de valores sugeridas por diferentes autores, normas e publicações, incluindo Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessôa (2014), ABNT (2011), Von Sperling e Chernicharo (2005), WEF (1992, 2000) Tchobanoglous *et al* (2003) e Daigger e Boltz (2011).

Tabela 6 – Parâmetros de projeto e taxas de operação para filtros percoladores

Tipo do filtro percolador	Baixa taxa	Alta taxa	Alta taxa
Meio suporte	<b>Brita</b>	<b>Brita</b>	<b>Plástico</b>
Eficiência de remoção em termos de DBO (%)	<b>80 - 90</b> <sup>(1)</sup> <b>80 - 85</b> <sup>(4)</sup>	<b>80 - 90</b> <sup>(1,a)</sup> <b>50 - 90</b> <b>65 - 80</b> <sup>(4)</sup>	<b>70 - 90</b> <sup>(1,a)</sup> <b>60 - 90</b> <b>65 - 85</b> <sup>(4)</sup>
DBO efluente (mg/l)	<b>&lt; 30,0</b> <sup>(1)</sup>	<b>&lt; 30,0</b> <sup>(1,a)</sup>	<b>&lt; 30,0</b> <sup>(1)</sup>
Objetivo quanto à nitrificação	<b>Ocorre nitrificação</b>	<b>Não ocorre nitrificação</b> <sup>(1)(2)</sup> <b>ou Nitrificação parcial</b> <sup>(4)(5)</sup>	<b>Não ocorre nitrificação</b>
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> efluente (mg/l)	<b>&lt; 5,0</b> <sup>(1)</sup>	<b>&gt; 5,0</b> <sup>(1,a)</sup>	<b>&gt; 5,0</b> <sup>(1)</sup>
Taxa de aplicação hidráulica ou Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(Baixa Taxa) <b>1,0 - 4,0</b> <sup>(1)(4)(5)</sup> <b>&lt; 5,0</b> <sup>(2)(3)</sup> <b>1,0 - 3,6</b> <sup>(7)</sup>	(Alta Taxa) <b>4,0 - 40,0</b> <sup>(1,a)</sup> <b>10,0 - 50,0</b> <sup>(2)</sup> <b>&lt; 50,0</b> <sup>(3)</sup> <b>10,0 - 40,0</b> <sup>(4)(5)</sup> <b>9,4 - 36,6</b> <sup>(7)</sup>	(Alta Taxa) <b>15,0 - 75,0</b> <sup>(1,a)</sup> <b>&gt; 43,2</b> <sup>(1,a,P90°)</sup> <b>10,0 - 75,0</b> <sup>(2)(3)</sup> <b>12,0 - 70,0</b> <sup>(4)</sup>
Carga orgânica volumétrica em termos de DBO (kg/m <sup>3</sup> ·d)	(Baixa Carga) <b>0,08 - 0,3</b> <sup>(1)</sup> <b>&lt; 0,3</b> <sup>(2, 3)</sup> <b>0,1 - 0,4</b> <sup>(4)(5)</sup> <b>0,1 - 0,2</b> <sup>(7)</sup> <b>&lt; 0,4</b> <sup>(6)</sup>	(Alta carga) <b>0,6 - 1,6</b> <sup>(1,a)</sup> <b>&lt; 1,2</b> <sup>(2, 3)</sup> <b>0,5 - 1,0</b> <sup>(4)(5)</sup> <b>0,4 - 1,8</b> <sup>(7)</sup> <b>0,64 - 1,6</b> <sup>(6)</sup>	(Alta carga) <b>0,6 - 2,4</b> <sup>(1,a)</sup> <b>&lt; 3,0</b> <sup>(2, 3)</sup> <b>0,5 - 1,6</b> <sup>(4)</sup>
Altura útil <sup>(h)</sup> (m)	<b>1,0 - 2,5</b> <sup>(1)</sup> <b>1,5 - 3,0</b> <sup>(2)</sup> <b>1,8 - 2,5</b> <sup>(4)(5)</sup>	<b>1,0 - 2,5</b> <sup>(1,a)</sup> <b>1,5 - 2,5</b> <sup>(2)</sup> <b>0,9 - 3,0</b> <sup>(4)(5)</sup>	<b>3,0 - 12,0</b> <sup>(1,a)(4)</sup> <b>4,0 - 12,0</b> <sup>(2)</sup>
Taxa de recirculação (Q <sub>R</sub> /Q)	<b>0 - 1</b> <sup>(1)</sup>	<b>1 - 2</b> <sup>(1,a)</sup>	<b>1 - 2</b> <sup>(1,a)</sup>
Frequência de recirculação	<b>Mínima</b> <sup>(4)(5)</sup>	<b>Sempre</b> <sup>(4)</sup>	<b>Sempre</b> <sup>(4)</sup>
Presença de moscas e vetores	<b>Muita</b> <sup>(2)(4)</sup>	<b>Variável</b> <sup>(2)(4)</sup>	<b>Pouca</b> <sup>(2)(4)</sup>
Perda de biofilme	<b>Intermitente</b> <sup>(4)</sup>	<b>Contínua</b> <sup>(4)</sup>	<b>Contínua</b> <sup>(4)</sup>

FONTE: <sup>(1)</sup> Metcalf & Eddy (2016), <sup>(2)</sup> Jordão e Pessôa (2014), <sup>(3)</sup> ABNT (2011), <sup>(4)</sup> Von Sperling e Chernicharo (2005), <sup>(5)</sup> Chernicharo (2001), <sup>(6)</sup> WEF (2000), <sup>(7)</sup> WEF (1992).

**Notas:** <sup>(a)</sup> Aeração forçada promovida por sopradores de baixa pressão. <sup>(B)</sup> Pedra brita. <sup>(P)</sup> Plástico. <sup>(P90°)</sup> Plástico estruturado de fluxo vertical 90°. <sup>(P60°)</sup> Plástico estruturado de fluxo cruzado 60°. <sup>(h)</sup> Ao variar a altura útil em projeto, deve-se verificar o perfil hidráulico da ETE, a perda de carga e a necessidade de prever elevatória de recuperação de nível para a vazão afluente e para a vazão a ser recirculada.

Von Sperling e Chernicharo (2005) observam que as eficiências de remoção de DBO descritas pelos autores referenciados na Tabela 6 são mais próximas às esperadas para sistemas compostos por decantação primária seguida de filtro percolador e decantação secundária.

Para sistemas em que a decantação primária é substituída por reatores anaeróbios, a eficiência do filtro tende a ser menor. Isso ocorre porque a degradação biológica da matéria orgânica em um reator anaeróbio é maior se comparada ao processo de decantação primária. A eficiência do filtro percolador quanto à remoção de DBO diminui, portanto, porque o afluente ao filtro possui menor quantidade de matéria orgânica facilmente degradável. Apesar dessa diferença, a eficiência total de um sistema com decantação primária ou com reator anaeróbio a montante do filtro percolador tende a ser semelhante (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Considerando tais afirmações, Chernicharo (2001) e Von Sperling e Chernicharo (2005) apresentaram a Tabela 7, que sugere faixas de taxa de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica e altura útil para filtros percoladores empregados após reatores anaeróbios.

Tabela 7 – Critérios de dimensionamento para filtros percoladores de alta taxa empregados após reatores anaeróbios

Vazão de referência	Q <sub>media</sub>	Q <sub>máx,dia</sub>	Q <sub>máx,hora</sub>
Meio suporte	Brita	Brita	Brita
Taxa de aplicação hidráulica ou Carga hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	<b>15 - 18</b>	<b>18 - 22</b>	<b>25 - 30</b>
Carga orgânica volumétrica em termos de DBO (kg/m <sup>3</sup> ·d)	<b>0,5 - 1,0</b>	<b>0,5 - 1,0</b>	<b>0,5 - 1,0</b>
Altura útil (m)	<b>2 - 3</b>	<b>2 - 3</b>	<b>2 - 3</b>

FONTE: Adaptado de Chernicharo (2001) e Von Sperling e Chernicharo (2005).

Em ETEs com filtros percoladores com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado estudadas por Henrich e Margraff (2013), mesmo com as cargas aplicadas compatíveis com as recomendadas para filtros de alta taxa, ocorreu a nitrificação, com alta remoção de nitrogênio amoniacal. Essa diferença entre as taxas de literatura e as taxas aplicadas e a obtenção de nitrificação no tratamento é atribuída ao meio suporte plástico, que oferece maior área superficial específica, aumentando a área disponível para crescimento da biomassa, e que possibilita o aumento da profundidade do filtro sem prejudicar a aeração natural, em função do maior índice de vazios oferecido pelo meio suporte plástico.

### 2.5.2.8 Recomendações nacionais normatizadas

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da Norma Brasileira Regulamentadora NBR 12.209/2011 “Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários”, recomenda que o filtro percolador seja dimensionado para atender a vazão média de projeto.

A montante do filtro, são necessárias as etapas de retenção de sólidos grosseiros, retenção de areia e gordura e retenção de sólidos sedimentáveis. A jusante do filtro, faz-se necessária unidade de decantação secundária (ABNT, 2011).

Para o meio suporte do filtro, a ABNT sugere pedra brita 4, sendo 95 % do material entre 5 e 8 cm. A Norma também cita o seixo rolado e os materiais plásticos como opção para meio suporte. A distribuição do afluente ao filtro deve ser feita por meio de sistema de distribuição rotativo, com braços e aspersores, de tal forma a manter uma vazão aplicada uniformemente, igual em qualquer ponto da área superficial do filtro (ABNT, 2011).

Para filtros de alta taxa com pedra brita, a NBR indica altura útil de até 3 m, carga orgânica volumétrica em termos de DBO menor ou igual a  $1,2 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  e taxa de aplicação hidráulica menor ou igual a  $50 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , enquanto para filtros de baixa taxa, a carga orgânica recomendada é menor ou igual a  $0,3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  de DBO e taxa de aplicação hidráulica menor ou igual a  $5 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  (ABNT, 2011).

Já para filtros com meio suporte plástico, a NBR sugere que a altura útil pode chegar a 12 m, com carga orgânica volumétrica em termos de DBO menor ou igual a  $3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  e taxa de aplicação hidráulica entre 10 e  $75 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$  (ABNT, 2011).

Para a drenagem de fundo do efluente final, é recomendada declividade mínima de 1 % e velocidade mínima do efluente maior ou igual a 0,6 m/s, sendo que a seção molhada da vazão máxima somada à vazão de recirculação não deve ser superior a 50 % (ABNT, 2011).

Para que ocorra nitrificação, a taxa de aplicação de nitrogênio amoniacal  $\text{NH}_4^+$  não deve ser superior a  $1,0 \text{ g/m}^2 \cdot \text{d}$  (ABNT, 2011).

Os parâmetros e as recomendações citadas na NBR 12.209/2011 vão ao encontro de outras referências como Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessôa (2014), Von Sperling e Chernicharo (2005), entre outras, com pequenas variações de faixas de valores para cada parâmetro, conforme apresentado na Tabela 6, item 2.5.2.7.

### 2.5.2.9 Materiais utilizados como meio suporte

Dentre os materiais mais utilizados como meio suporte para o biofilme do filtro percolador, cita-se os materiais em pedra brita e pedra lava, que, conforme a norma reguladora deve ter medidas entre 50 mm e 76 mm (ABNT, 1993), plásticos randômicos e plásticos estruturados. Atualmente, inúmeros estudos realizados já verificaram o comportamento de diferentes materiais. As pedras e os materiais plásticos são largamente utilizados, tanto em novos empreendimentos quanto em ETEs em que é necessária a substituição de meio suporte de filtros percoladores mais antigos. Nesses casos, o objetivo pode ser eliminar problemas de colmatção do meio suporte anterior ou aumentar a capacidade de tratamento do filtro existente, por exemplo (METCALF & EDDY, 2016).

Enquanto os filtros com pedra brita são de altura útil máxima igual a 3 m, os filtros com meio suporte plástico estruturado podem ser construídos com até 12 m de altura, o que representa a possibilidade de realização de nitrificação parcial ou total no mesmo filtro em que é realizada a degradação de matéria orgânica (METCALF & EDDY, 2016; HENRICH e MAEGGRAFF, 2013).

O incremento de altura é possível porque o índice de vazios superior a 97 %, permitindo a aeração natural nas camadas mais profundas, e porque a massa específica do material plástico estruturado é cerca de 97 % mais leve se comparada à da pedra brita, conforme mostrado na Tabela 8, possibilitando a instalação do meio suporte com até 12 m de altura, em uma estrutura esbelta e econômica. Não é necessário que as paredes laterais tenham função estrutural, já que o meio suporte estruturado é autoportante. Também não é necessário laje de drenagem, já que os blocos de plástico podem ser simplesmente apoiados em vigas, em concordância com o fluxo de drenagem do efluente na laje de fundo. A pedra brita, por outro lado, exige que a estrutura de concreto, incluindo, fundações, laje de fundo, laje de drenagem e paredes laterais, seja muito mais robusta para suportar os esforços em função da massa específica, e também porque a pedra brita não é um material estruturado autoportante (METCALF & EDDY, 2016; HENRICH e MAEGGRAFF, 2013).

O valor de aquisição do meio suporte plástico estruturado é superior ao valor da pedra brita. Em compensação, o plástico apresenta vantagens como maior área superficial específica para fixação do biofilme e maior índice de vazios, conforme apresentado na Tabela 8, além de outras vantagens que indicam redução ou



compensação de custos de implantação, operação e manutenção dos filtros (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Grady *et al.* (1999) observaram que filtros percoladores com meio suporte em brita e em plástico operando com cargas orgânicas inferiores a  $1,0 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{d}$  de DBO apresentaram o mesmo desempenho. Já na operação com elevadas cargas orgânicas, o plástico estruturado apresentou desempenho muito superior à brita, resultante da maior área superficial específica para fixação do biofilme e do maior índice de vazios, favorecendo a circulação de ar e o desprendimento do excesso de biofilme, natural ou provocado pela lavagem ou *flushing* (METCALF & EDDY, 2016).

Na Tabela 8 é possível verificar as propriedades físicas de alguns materiais utilizados como meio suporte em filtros percoladores.

Tabela 8 – Propriedades físicas dos materiais utilizados como meio suporte para filtros percoladores

		Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	Índice de vazios (%)	Altura máxima do filtro (m)	Massa específica aparente ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
Pedra brita Pedra “lava”		50 – 70	< 55	1,5 - 2,5 <sup>(1)</sup> < 3,0 <sup>(2)(3)</sup>	1000 - 1300
Pedra “lava”		50 – 70	< 55	1,5 - 2,5 <sup>(1)</sup> < 3,0 <sup>(2)(3)</sup>	1000 - 1300
Escória residual de alto forno		45 – 70	< 55	1,5 - 2,5 <sup>(1)</sup> < 3,0 <sup>(2)(3)</sup>	1000 - 1300
Plástico randômico <sup>(5)</sup>		98 – 125	< 95	<sup>(4)</sup>	27 - 53
Plástico estruturado de fluxo cruzado <sup>(5)</sup>		100 - 223	> 95	12,0 <sup>(1)(2)</sup>	25 - 45
Plástico estruturado de fluxo vertical DHS <sup>(6)</sup>		87	> 95	12,0 <sup>(1)(2)</sup>	25 - 45

FONTE: Adaptado de Bruce e Merckens (1970), Parker e Richards (1986) Harrison e Daigger (1987), Tchobanoglous (2003), Almeida (2011), Jordão e Pessôa (2014) e Metcalf & Eddy (2016).

**Notas:** <sup>(1)</sup> Filtros de baixa taxa. <sup>(2)</sup> Filtros de alta taxa. <sup>(3)</sup> Altura limitada em função da manutenção da aeração natural. <sup>(4)</sup> Altura limitada em função da manutenção da aeração natural e da possibilidade de amassamento das peças plásticas devido à massa específica do biofilme aderido ao plástico. <sup>(5)</sup> Características dos materiais podem variar conforme o fornecedor. <sup>(6)</sup> Plástico estruturado preenchido com espuma de poliuretano - *Downflow Hanging Sponge* (DHS).

Para filtros que operam em regime de baixa taxa de aplicação hidráulica e baixa carga orgânica, a pedra brita, desde que criteriosamente selecionada, pode ser mais viável tecnicamente e financeiramente (METCALF & EDDY, 2016).

Por outro lado, a alta capacidade de escoamento, o elevado índice de vazios e a menor propensão a entupimento e colmatção fazem com que os materiais plásticos estruturados sejam mais adequados para utilização em filtros que operam em regime de alta taxa de aplicação hidráulica e alta carga orgânica (METCALF & EDDY, 2016).

A partir de experimentos realizados no Brasil, Almeida (2007) apontou que a pedra brita apresentou resultados mais satisfatórios se comparados aos resultados obtidos com meio suporte plástico randômico (não estruturado) quanto à remoção de matéria orgânica e conversão de nitrogênio para filtros percoladores que operam em regime de baixa taxa hidráulica e baixa carga orgânica. Por outro lado, aumentando a carga orgânica volumétrica e a taxa de aplicação superficial, os materiais plásticos empregados como meio suporte oferecem mais eficiência em relação à pedra brita, confirmando o que foi apresentado por Metcalf & Eddy (2016).

Os materiais plásticos randômicos (não estruturados) não apresentam resistência estrutural ao peso próprio quando colonizados, não sendo, por esse motivo indicados para utilização. Conforme a biomassa aderida ao meio suporte cresce, a massa específica do meio suporte aumenta, as camadas mais inferiores sofrem esmagamento e ocorre a colmatção do filtro (METCALF & EDDY, 2016).

Outra característica do meio suporte que pode interferir na eficiência do filtro percolador é a rugosidade da superfície do material. Estudos realizados por Almeida (2007) e Medeiros (2011) indicam que há uma possível relação entre rugosidade, fixação e desenvolvimento do biofilme e eficiência do filtro e que alguns fatores como o menor índice de vazios e a maior rugosidade da superfície da pedra facilitam a fixação da biomassa e o desenvolvimento do biofilme.

Almeida (2007) sugere que a reduzida eficiência do meio plástico randômico em relação à pedra brita quando em filtros de baixa taxa pode ser devida ao tempo de formação e fixação do biofilme em função da rugosidade dos materiais. Enquanto a pedra apresenta mais rugosidade, favorecendo a aderência e fixação do biofilme na superfície, materiais plásticos tendem a ser menos rugosos, dificultando a fixação do biofilme quando operando a baixas taxas de aplicação, podendo inclusive perder

biofilme no efluente em função da dificuldade de fixação do mesmo na superfície plástica.

Já Medeiros (2011) verificou que a velocidade de formação do biofilme na pedra brita foi significativamente maior se comparada à do meio suporte plástico randômico, atribuindo esta verificação ao fato de a rugosidade da superfície da pedra ser maior em relação à da superfície do material plástico, facilitando a aderência e fixação do biofilme em formação.

Almeida (2011) verificou a utilização de meio suporte plástico de fluxo vertical com espuma de poliuretano, configuração chamada *Downflow Hanging Sponge* (DHS), observando a melhoria da qualidade do efluente final. Neste caso, o desempenho do sistema de reator anaeróbio tipo UASB associado ao filtro percolador com DHS apresentou-se significativamente melhor em relação aos demais sistemas.

Almeida (2011) sugere que a variação da taxa de aplicação hidráulica e da carga orgânica volumétrica foi menos sentida pelo filtro percolador com meio suporte em DHS, indicando que a qualidade do efluente final variou menos em função dessas variações operacionais. Adicionalmente, foi observada menor produção de lodo, o que reforça a potencialidade de uso de espumas de poliuretano como material de enchimento, sendo essa uma promissora alternativa para a melhoria da qualidade do efluente final, principalmente nos casos em que se deseja suprimir o uso de decantadores secundários.

Quanto à estimativa de perda de carga hidráulica que ocorre ao longo do filtro percolador em função do meio suporte, Metcalf & Eddy (2016) apresentam as equações 45 e 46, que relacionam a perda de carga à velocidade superficial de escoamento, entre outras variáveis.

$$N_P = 10,33 \cdot (D) \cdot e^{(1,36 \cdot 10^{-5})(\frac{L}{A})} \quad (45)$$

$$\Delta P = N_P \cdot \left( \frac{v^2}{2 \cdot g} \right) \quad (46)$$

Sendo:

$N_P$  : número de resistência da torre (adimensional)

$D$  : altura do meio suporte (m)

$L$  : carga de líquido (kg/h)

- A : área da seção transversal do enchimento da torre ( $\text{m}^2$ )  
 $\Delta P$  : perda de carga total (kPa)  
 g : aceleração gravitacional ( $\text{m/s}^2$ )  
 v : velocidade de escoamento superficial ( $Q/A$ ) ( $\text{m/s}$ )

Tais equações foram originalmente concebidas para meio suporte plástico de fluxo vertical. Apesar de não haver equações similares para determinação da resistência para outros materiais utilizados como meio suporte, WEF (2010) e Metcalf & Eddy (2016) apresentam fatores de correção para brita, plástico randômico e plástico estruturado de fluxo cruzado, conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Fatores de correção para cálculo de perda de carga em diferentes materiais utilizados como meio suporte

Meio suporte	Área superficial específica ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )	Fator de correção
<b>Brita</b>	45	2,0
<b>Plástico randômico</b>	100	1,6
<b>Plástico estruturado de fluxo cruzado</b>	100	1,3
	140	1,6

FONTE: Adaptado de WEF (2010) e Metcalf & Eddy (2016).

Para definição do meio suporte a ser adotado, deve-se verificar a viabilidade do custo da obra, considerando não apenas o custo de aquisição do material adotado, mas ainda outros fatores como volume de meio suporte necessário, estrutura de concreto armado necessária, eficiência obtida, facilidades de operação e manutenção, entre outros aspectos que impactam principalmente as etapas de implantação, operação e manutenção (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

A definição do material ideal para meio suporte deve considerar, portanto, o objetivo do filtro percolador quanto à nitrificação, a área superficial específica para cada material para meio suporte, os custos de aquisição e os custos indiretos relacionados, bem como a durabilidade do material, o índice de vazios para que ocorra boa circulação de ar e minimização da colmatagem e entupimentos, entre outros, compondo uma análise de viabilidade que aborde aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, (METCALF & EDDY, 2016).

#### 2.5.2.10 Sistema de distribuição da vazão afluyente ao filtro percolador

A distribuição do afluyente na superfície do filtro percolador é realizada por meio de aspersores fixos ou móveis que devem distribuir a vazão afluyente uniformemente ao longo de toda a superfície do filtro percolador (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Os sistemas de distribuição móveis giratórios são compostos por braços distribuidores atirantados a uma coluna central do filtro, onde fica a tubulação afluyente. O eixo do sistema de distribuição é conectado à tubulação afluyente e a vazão é distribuída através dos braços e dos orifícios ou aspersores. O fluxo hidráulico que passa pelos orifícios ou aspersores rotaciona o sistema de distribuição através da força hidráulica (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Os orifícios ou bicos aspersores que distribuem o afluyente com mais pressão implicam normalmente em um sistema que demanda mais energia de bombeamento, além de propiciarem condições mais favoráveis ao entupimento. Em sistemas de distribuição mais eficientes sob o aspecto energético, o afluyente é distribuído de forma não pressurizada, minimizando a ocorrência de entupimentos e facilitando a limpeza e a manutenção preventiva. Recomenda-se que as tubulações do sistema de distribuição sejam inferiores a 300 mm e com até cerca de 1.200 l/s (DWA, 2016).

É importante que seja observada a uniformidade da taxa de aplicação hidráulica em toda a superfície do filtro, ao longo do braço distribuidor, visando garantir a aplicação da mesma vazão por metro quadrado em qualquer ponto da superfície do filtro. Para tal, a vazão distribuída deve ser proporcional à superfície de alimentação (METCALF & EDDY, 2016; DWA, 2016).

A igualdade de aplicação da vazão por área pode ser verificada através de um teste em que são colocados recipientes de igual volume em diferentes pontos da superfície do meio suporte do filtro. Após posicionados todos os recipientes, a distribuição do afluyente é iniciada e, após um intervalo de tempo pode-se verificar se todos os recipientes reservaram aproximadamente o mesmo volume afluyente (HENRICH e MAEGGRAFF, 2013).

A velocidade de rotação do sistema é calculada a partir do conceito de “poder de lavagem”, ou *Spülkraft*, desenvolvido na Alemanha, e das variáveis relacionadas, tais como taxa de aplicação hidráulica, razão de recirculação e número de braços distribuidores do sistema (METCALF & EDDY, 2016), detalhado no item 2.5.2.12.

#### 2.5.2.11 Crescimento e controle do biofilme

O biofilme é uma camada gelatinosa composta por micro-organismos capazes de realizar a retenção e a depuração de substâncias coloidais e materiais particulados presentes no esgoto. O oxigênio é difundido para o interior do biofilme, promovendo o crescimento aeróbio da biomassa. O material que periodicamente pode se desprender do biofilme fica retido no processo seguinte, de sedimentação, clarificação ou decantação secundária (METCALF & EDDY, 2016).

Dependendo das condições operacionais, a espessura do biofilme pode chegar a 10 mm. Na superfície mais externa do biofilme, a atividade é totalmente aeróbia, porém à medida que os micro-organismos se multiplicam e a espessura do biofilme aumenta, o oxigênio é consumido ao longo da espessura e não atinge a camada mais interna, podendo estabelecer um ambiente anaeróbio no limite entre o biofilme e o meio suporte. Por esse motivo, é importante assegurar que a biomassa não cresça excessivamente, principalmente na parte mais superior do filtro, onde ocorre mais disponibilidade de matéria biodegradável, resultando em um crescimento mais acelerado da biomassa (METCALF & EDDY, 2016).

Uma das formas de controle do crescimento é promover o desprendimento da biomassa em excesso realizando uma manutenção periódica a partir da diminuição da velocidade de rotação do sistema de distribuição, resultando em um aumento da taxa de aplicação hidráulica, ou seja, um processo de lavagem periódica do meio suporte, também chamado de *flushing* (DWA, 2016), detalhado no item 2.5.2.12.

#### 2.5.2.12 Lavagem do meio suporte (*Spülkraft* ou *flushing*)

A lavagem do meio suporte, originalmente chamada de *Spülkraft* ou *flushing*, é um processo de manutenção periódica realizado a partir da diminuição da velocidade de rotação do sistema de distribuição, resultando em um aumento da taxa de aplicação hidráulica em um determinado período de tempo (DWA, 2016).

Realizando a lavagem do meio suporte uma vez por dia, é possível controlar a espessura do biofilme em filtros percoladores de baixa taxa. A taxa de dosagem é função da carga hidráulica total, ou seja, vazão afluyente somada à vazão de recirculação, do número de braços no sistema de distribuição e da velocidade de rotação do sistema (METCALF & EDDY, 2016).

Metcalf & Eddy (2016) e Jordão e Pessôa (2014) apresentam o cálculo de taxa de dosagem em milímetros por passagem do braço, conforme equação 47.

$$SK = \frac{(1 + r) \cdot TAH \cdot (1000 \text{ mm/m})}{N \cdot n \cdot (1440 \text{ min/d})} \quad (47)$$

Sendo:

SK : taxa de dosagem ou dosagem de aplicação (mm /passagem)

r : razão ou fração de recirculação (adimensional)

TAH : taxa de aplicação hidráulica ou carga hidráulica (m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d)

N : número de braços distribuidores (unidades)

n : velocidade de rotação do sistema de distribuição (rpm)

Na Tabela 10 estão apresentados os valores recomendados para taxas de dosagem afluyente em função da carga de DBO.

Tabela 10 – Valores recomendados para taxas de dosagem para operação normal e para lavagem

Carga de DBO (kg/m <sup>3</sup> ·d)	Dosagem (mm/passagem)	
	Operação normal	Lavagem ( <i>flushing</i> )
<0,4	25 a 75	100
0,8	50 a 150	150
1,2	75 a 225	220
1,6	100 a 300	300
2,4	150 a 450	450
3,2	200 a 600	600

FONTE: WEF (2011), Metcalf & Eddy (2016).

O método internacional DWA (2016) também apresenta o cálculo do *Spülkraft* indicando em quantos milímetros aumenta o nível da água num recipiente sobre o filtro enquanto o sistema de distribuição é rotacionado. Para condições normais de operação, a taxa é de pelo menos 0,5 mm/rotação·h, sendo que taxas inferiores podem comprometer a eficiência do molhamento da superfície específica do meio suporte (DWA, 2016).

Periodicamente, a operação deve realizar a lavagem a taxas de até 2,5 mm/rotação·h (mm por rotação do braço por hora), a partir da redução da velocidade de rotação e do consequente aumento da taxa de alimentação da superfície do filtro. O cálculo de *Spülkraft* é obtido a partir das equações 48 e 49, apresentadas pela DWA (2016), de forma semelhante à apresentada por Metcalf & Eddy (2016) e por Jordão e Pessôa (2014).



$$SK = \frac{1000 \cdot q_A}{a \cdot n \cdot 60} \quad (48)$$

$$q_A = (Q_{T,d,aM/24}) + \frac{Q_R}{A} \quad (49)$$

Sendo:

SK	: taxa de dosagem do poder de lavagem ( <i>Spülkraft</i> ) (mm/rotação·h)
q <sub>A</sub>	: carga hidráulica aplicada (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·h)
a	: número de braços do sistema de distribuição do afluente (unidades)
n	: velocidade de rotação do sistema de distribuição afluente (rotação/min)
Q <sub>T,d,aM/24</sub>	: vazão afluente média anual diária (m <sup>3</sup> /d)
Q <sub>R</sub>	: vazão de recirculação (m <sup>3</sup> /h)
A	: área superficial do filtro (m <sup>2</sup> )

Adicionalmente, o método internacional DWA (2016) determina que alguns fatores de influência devem ser considerados para o cálculo da *Spülkraft*, necessários para a adequada operação. Os fatores  $\vartheta_1$ ,  $\vartheta_2$  e  $\vartheta_3$  estão relacionados à altura útil do meio suporte, à carga média diária de DQO e ao material utilizado como meio suporte, respectivamente, conforme apresentado na Tabela 11, na Tabela 12 e na Tabela 13 (DWA, 2016).

Tabela 11 – Fator de influência  $\vartheta_1$  relacionado à altura do meio suporte

Altura do meio suporte					
h (m)	≤1,8	≤3,0	≤4,6	≤6,1	>6,1
$\vartheta_1$	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0

FONTE: DWA (2016).

Tabela 12 – Fator de influência  $\vartheta_2$  relacionado à carga de DQO aplicada

Carga de DQO									
DQO (kg/m <sup>3</sup> d)	≤0,6	≤0,8	≤1,2	≤2,0	≤3,0	≤4,0	≤5,0	≤6,0	>6,0
$\vartheta_2$	1,5	1,8	2,5	3,2	4,0	5,0	6,5	8,0	10,0

FONTE: DWA (2016).

Tabela 13 – Fator de influência  $\vartheta_3$  relacionado ao material e tipo do meio suporte

Meio suporte	Plástico fluxo vertical			Plástico fluxo cruzado 60°			Plásticos randômicos (h <sub>max</sub> =5,0m)		Pedra brita ou lava (h <sub>max</sub> =4,0m)		
m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>	≤100	≤125	≤150	≤100	≤125	≤150	≤250	≤100	≤125	≤150	60 a 90
$\vartheta_3$	1,0	1,5	2,0	1,5	2,0	2,5	3,5	4,0	6,0	8,0	5,0

FONTE: DWA (2016).

Para obter valores intermediários não definidos previamente nas tabelas apresentadas, basta realizar a interpolação entre os intervalos. Outros valores também podem ser atribuídos de acordo com o fabricante de meio suporte plástico (DWA, 2016).

Para realizar a lavagem, é necessário controlar a velocidade de rotação do sistema de distribuição. Uma das formas de controle da velocidade pode ser com o posicionamento de alguns orifícios do braço de distribuição no lado oposto à direção de rotação, utilizando a própria força hidráulica para desacelerar a rotação. Também para o controle da velocidade, pode ser utilizado um motor elétrico, facilitando o controle da distribuição uniforme do afluente e permitindo o controle da velocidade de rotação para as eventuais lavagens do meio suporte (METCALF & EDDY, 2016).

#### 2.5.2.13 Colmatção e substituição do meio suporte

Henrich e Margraff (2013) e Seeger (2016) analisaram diferentes filtros percoladores em escala operacional, em diferentes países como Geórgia, Namíbia, Nicarágua e Emirados Árabes, em diferentes condições climáticas.

Nos estudos realizados nas estações de tratamento de esgoto em escala operacional, os filtros percoladores em operação já apresentavam problemas de colmatção do meio suporte em pedra brita, motivando a troca do material por meio suporte plástico estruturado. A troca objetivou ainda o aumento da eficiência a partir do aumento da área superficial específica oferecida pelo meio suporte plástico, passando de 40 a 80 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, estimado para a pedra brita, para de 100 a 240 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado (HENRICH E MARGRAFF, 2013).

Nos casos apresentados, os módulos plásticos estruturados adotados ofereciam as áreas específicas de 100 e 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, sendo as cargas aplicadas de 0,5 a 1,44 kg/m<sup>3</sup>·d para DBO e cerca de 0,5 kg/m<sup>3</sup>·d para NTK. As eficiências apresentadas são da ordem de 70 a 90 % para a remoção de DQO e superiores a 92 % para o nitrogênio amoniacal, chegando à concentração de 0,5 mg/l de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no efluente final (HENRICH E MARGRAFF, 2013).

Para estes casos, apesar das cargas aplicadas serem recomendadas para filtros de alta taxa ou intermediária, ocorreu a nitrificação, com alta remoção de nitrogênio amoniacal. Esta diferença entre as taxas de literatura e as taxas aplicadas

para nitrificação deve-se ao meio suporte plástico implantado (HENRICH E MARGRAFF, 2013).

Gomiero *et al.* (2016) também avaliaram filtros percoladores em escala operacional no Brasil, operando com pedra brita e, posteriormente, com meio suporte plástico estruturado. Além da colmatção do meio suporte em pedra brita, a troca do meio suporte para o plástico estruturado de fluxo cruzado foi motivada pela facilidade operacional e necessidade de melhorar a qualidade do efluente final. O aumento de área específica do meio suporte de 40 a 80 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> é significativo para o aumento da eficiência do tratamento, além de oferecer maior índice de vazios e, conseqüentemente, menos colmatção e prevenção quanto à formação de caminhos preferenciais. O maior índice de vazios do meio suporte plástico, superior a 97 %, permite maior entrada e circulação de ar no sistema, fornecendo mais oxigênio para a realização do tratamento, sem gastos com aeração forçada.

Os resultados analisados por Gomiero *et al.* (2016) mostram que quando o meio suporte era a pedra brita, o efluente final apresentava 153 mg/l de DQO, 57 mg/l de DBO e 47 mg/l de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>. Os resultados após a troca do meio suporte para plástico estruturado de fluxo cruzado são de 90 mg/l de DQO, 28 mg/l de DBO e 36 mg/l de NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, apontando melhoria de 41 e 50 % para remoção de DQO e DBO, e 23 % de aumento da nitrificação parcial, sendo o objetivo dos filtros neste caso apenas a remoção de matéria orgânica.

#### 2.5.2.14 Eficiência de molhamento do meio suporte

A eficiência de molhamento ou umidificação é definida pela razão entre a área molhada e a área superficial específica do meio suporte, variando de 0,2 a 0,6 (METCALF & EDDY, 2016).

Experimentos em escala reduzida aplicando diferentes cargas orgânicas volumétricas e taxas de aplicação superficial em um filtro percolador precedido de sistema de lagoas anaeróbia e facultativa possibilitaram a análise da eficiência de molhamento do meio suporte, indicando que para filtros percoladores de baixa taxa, a pedra brita é mais eficiente se comparada ao plástico randômico e que esse fato pode estar relacionado à eficiência de molhamento do meio suporte, bem como às diferentes rugosidades dos materiais utilizados como meio suporte (MEDEIROS, 2011).

As taxas de aplicação hidráulica nesse caso foram suficientes para molhar toda a superfície específica da brita, fazendo com que o biofilme se desenvolvesse satisfatoriamente, enquanto no plástico randômico (não estruturado), a eficiência de molhamento foi inferior, prejudicando o aproveitamento da maior área superficial específica oferecida por esse material (MEDEIROS, 2011).

Para a pedra brita, a eficiência de molhamento verificada foi entre 35 e 66 %, enquanto para o plástico randômico, entre 27 e 50 %. O estudo realizado indica que, quando submetidas à mesma aplicação hidráulica, a superfície da pedra brita é proporcionalmente mais molhada se comparada à superfície do plástico randômico (MEDEIROS, 2011).

Medeiros (2011) ressaltou que os experimentos foram realizados em um intervalo limitado de tempo e que os resultados apresentados retratam um filtro em início de operação, sugerindo que para um período mais prolongado de análises, as conclusões poderiam ser diferentes.

Almeida (2007) e Almeida *et al.* (2011) relataram o mesmo sub aproveitamento da área superficial específica do meio suporte plástico randômico (não estruturado) para filtros percoladores operando em baixa taxa, concluindo que para filtros percoladores de baixa taxa, o meio suporte em pedra brita oferece maior eficiência em relação ao meio suporte plástico randômico.

#### 2.5.2.15 Aeração e arraste de ar no interior do filtro percolador

A ventilação promovida pelas aberturas inferiores ao longo de todo o perímetro do filtro percolador promove a realização da troca de ar interno e externo e a manutenção do fluxo de ar, da ventilação e das condições aeróbias do meio suporte (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

Para tal, o efluente final pode ocupar no máximo 50 % da seção das aberturas inferiores e, para filtros de grande diâmetro, os canais de coleta do efluente devem ser ramificados, com aberturas de ventilação ao longo do perímetro do filtro. Ainda, quanto à laje de drenagem do meio suporte, a área das aberturas para drenagem deve ser superior a 15 % da área de superfície do filtro e para cada 23 m<sup>2</sup> de área superficial do filtro, deve haver 1 m<sup>2</sup> de área aberta para drenagem e ventilação (VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005).

A diferença de temperatura entre o ar no ambiente externo e o ar no interior do filtro percolador induz o arraste natural de ar e o fluxo de ar no filtro. Quando a temperatura do afluente é inferior à temperatura externa, o ar frio no interior do filtro se movimenta em fluxo descendente. Quando ocorre o contrário e o ar interno apresenta temperatura superior ao ambiente externo e o fluxo de ar passa a ser ascendente. Esta última condição é menos desejável sob o aspecto de transferência de massa, uma vez que a pressão parcial do oxigênio e a taxa de transferência do oxigênio para o afluente será menor na região mais superficial do filtro, onde há maior demanda de oxigênio (METCALF & EDDY, 2016).

A inversão do sentido do fluxo do ar ocorre quando a diferença entre a temperatura interna e externa ao filtro é de  $\pm 2$  °C. A diferença de 4 °C pode provocar um fluxo de ar com velocidade média de 18 m/h, atendendo a demanda a que se propõe o filtro percolador (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Ainda quanto à altura do meio suporte e a temperatura, para um mesmo volume de meio suporte, a DWA (2017) afirma que filtros mais altos com diâmetros menores tendem a propiciar uma condição de temperatura mais constante no interior do filtro, enquanto em filtros de menor profundidade e maior diâmetro, a temperatura interna sofre mais variações em função da maior área de contato direto entre o meio suporte e a atmosfera.

O arraste de ar resultante da diferença de temperatura e umidade do ar é calculado segundo a equação 50 de Schroeder e Tchobanoglous (1976).

$$D_{ar} = 353 \cdot \left( \frac{1}{T_c} - \frac{1}{T_h} \right) \cdot Z \quad (50)$$

Sendo:

$D_{ar}$  : arraste natural de ar (mm de água)

$T_c$  : menor temperatura (K)

$T_h$  : maior temperatura (K)

$Z$  : altura do meio suporte (m)

Uma estimativa mais conservadora da temperatura média de ar no meio suporte é obtida com base no cálculo da média logarítmica das temperaturas, conforme a equação 51 (METCALF & EDDY, 2016).

$$T_m = \frac{T_2 - T_1}{\ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)} \quad (51)$$

Sendo:

$T_m$  : temperatura média (K)

$T_2$  : maior temperatura (K)

$T_1$  : menor temperatura (K)

#### 2.5.2.16 Recirculação do efluente dos filtros percoladores

A recirculação é um parâmetro significativo no projeto de filtros percoladores, pois afeta a taxa de aplicação hidráulica, a eficiência de molhamento do meio suporte, o crescimento do biofilme, o tempo de detenção hidráulica no sistema e a eficiência do tratamento aeróbio. O aumento da taxa de aplicação hidráulica no filtro percolador, provocado pela vazão de recirculação somada à vazão afluenta à ETE, aumenta a eficiência de molhamento do meio suporte, pode auxiliar a manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição constante e a uniformidade da vazão afluenta ao filtro, e possibilita o controle do crescimento do biofilme (METCALF & EDDY, 2016).

A diluição da carga orgânica afluenta por meio da recirculação reduz a taxa de oxidação biológica nas primeiras camadas de meio suporte. Ainda, uma maior quantidade de oxigênio dissolvido é incorporada à vazão afluenta ao filtro, auxiliando a manutenção das condições aeróbias do tratamento (METCALF & EDDY, 2016).

Para promover a recirculação, é necessário que o sistema possua sistema de recalque com conjuntos motobomba e, se possível, com sistemas de inversor de frequência para maior flexibilidade operacional. Em filtros com meio suporte plástico de fluxo cruzado, é recomendada a prática de recirculação com uma taxa de aplicação de 0,25 l/m<sup>2</sup>·s (METCALF & EDDY, 2016).

São definidos dois parâmetros quanto à recirculação: a razão de recirculação e o fator de recirculação. A razão de recirculação é a relação entre a vazão recirculada e a vazão afluenta, calculada conforme equação 52. Já o fator de recirculação representa o número médio de passagens da matéria orgânica pelo filtro e é calculada em função da razão de recirculação, conforme equação 53 (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

$$r = \frac{Q_{\text{recirculação}}}{Q_{\text{afluente}}} \quad (52)$$

$$F = \frac{1+r}{\left(1+\frac{r}{10}\right)^2} \quad (53)$$

Sendo:

- $r$  : razão de recirculação (adimensional)  
 $Q_{\text{recirculação}}$  : vazão de recirculação (l/s, m<sup>3</sup>/h ou m<sup>3</sup>/d)  
 $Q_{\text{afluente}}$  : vazão afluente (l/s, m<sup>3</sup>/h ou m<sup>3</sup>/d)  
 $F$  : fator de recirculação (adimensional)

Na Tabela 14 são apresentados alguns valores como exemplos de razão de recirculação e fator de recirculação em função do número de passagens pelo filtro.

Tabela 14 – Razão e fator de recirculação

Número de passagens pelo filtro	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0
Razão de Recirculação (r)	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Fator de Recirculação (F)	1,00	1,36	1,65	1,88	2,09	2,31	2,51

FONTE: Jordão e Pessoa (2014).

Jordão e Pessoa (2014) sugerem que a recirculação do efluente do filtro percolador, quando praticada, pode ocorrer para o afluente do tratamento primário ou para o afluente do próprio filtro percolador e que a recirculação do lodo do decantador secundário para a etapa primária de tratamento pode ser praticada visando o aumento do tempo de retenção do lodo no processo e o aumento da estabilidade biológica do lodo.

Ao contrário do que sugere Jordão e Pessoa (2014), a DWA (2016) orienta que a vazão de recirculação não deve constituir uma carga hidráulica e orgânica adicional para o dimensionamento dos demais processos unitários a montante e jusante do filtro percolador e que, normalmente, a recirculação deve ocorrer apenas no filtro percolador.

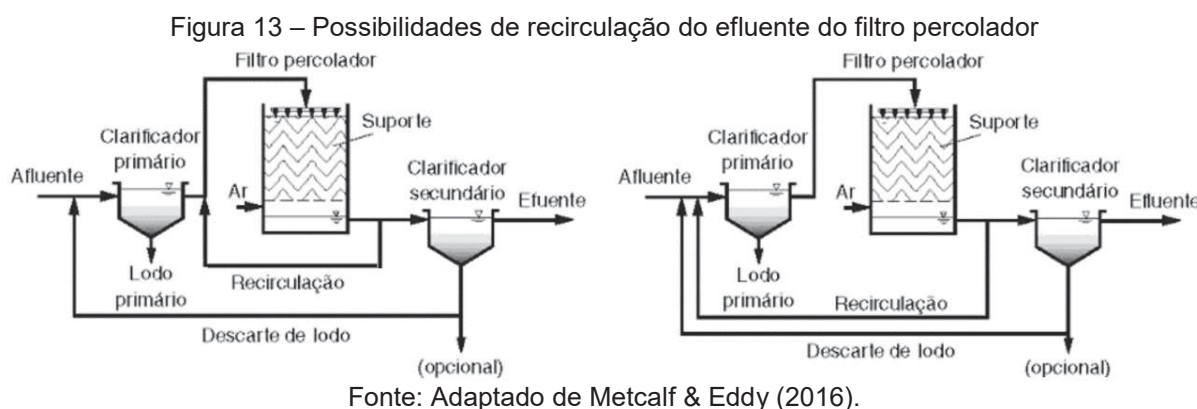
Von Sperling e Chernicharo (2005) afirmam que a recirculação do efluente do filtro dilui a vazão afluente e propicia uma homogeneização quando há variações de carga, bem como pode ser programada de forma a proporcionar vazão constante ao longo do dia, visando à manutenção da vazão média afluente ao filtro percolador e, consequentemente, à manutenção da taxa de aplicação hidráulica.



Von Sperling e Chernicharo (2005) complementam ainda que a recirculação diminui a probabilidade de colmatção, odores e moscas, e tende a tornar o esgoto mais fresco caso a vazão recirculada seja encaminhada ao início do processo, reduzindo a formação de espuma e odores no tratamento primário. Por outro lado, nesse caso, a recirculação representa custos adicionais para o recalque da vazão a ser recirculada e exige aumento da capacidade e maiores dimensões das unidades de tratamento a montante e a jusante do filtro, uma vez que a vazão afluenta passa a ser a soma da vazão de entrada com a vazão recirculada.

Metcalf & Eddy (2016) acrescentam que, independentemente do fluxograma de recirculação estabelecido para a ETE, a taxa de recirculação reflete positivamente na eficiência de molhamento do meio suporte, controla a espessura do biofilme e auxilia a manutenção da condição aeróbia, e que, para a realimentação do filtro, é necessário prever sistema de bombeamento, obedecendo a proporção estabelecida em projeto para vazão afluenta e vazão recirculada.

Ainda que a alimentação do filtro percolador seja por gravidade, a vazão de recirculação será obrigatoriamente recalçada. O controle do sistema deve assegurar a capacidade de bombeamento da vazão recirculada para a entrada do filtro percolador e o dimensionamento do filtro deve prever a vazão de recirculação (DWA, 2016). Von Sperling e Chernicharo (2005) sugerem a utilização de inversores de frequência nas bombas para obter maior eficiência energética do sistema e melhor adequação da operação do equipamento com variações de vazão ao longo do dia. Na Figura 13 são apresentados possíveis fluxogramas de recirculação



A primeira possibilidade de fluxograma de recirculação apresentada por Metcalf & Eddy (2016) é recircular o efluente do filtro para o próprio filtro, conforme

ênfatiza a DWA (2016). A segunda possibilidade é recircular o efluente do filtro para etapa de tratamento a montante do filtro, implicando em maiores unidades de tratamento a montante, ou seja, com maior capacidade hidráulica.

A DWA (2016) recomenda ainda que, caso o filtro percolador seja projetado para receber afluente com concentração de DQO superior a 500 mg/l, as dimensões do filtro e a vazão de recirculação e o *Spülkraft* devem ser reavaliados, conforme as particularidades do caso.

#### 2.5.2.17 Nitrificação e desnitrificação em filtros percoladores

Quando se deseja promover a degradação de matéria orgânica e a nitrificação em filtros percoladores de forma combinada, as bactérias heterotróficas, que crescem com mais velocidade e produzem mais biomassa, competirão por espaço no meio suporte com as bactérias autotróficas nitrificantes. O desenvolvimento das bactérias nitrificantes só acontece, portanto, quando o tratamento atingir níveis maiores de degradação de matéria orgânica, com concentrações de DBO solúvel da ordem de 10 a 5 mg/l. Para disponibilizar mais área superficial específica para o crescimento da biomassa heterotrófica e autotrófica, as taxas de aplicação hidráulicas devem ser reduzidas e os volumes dos filtros são, conseqüentemente aumentados em relação aos filtros dimensionados apenas para degradação de matéria orgânica, assegurando área suficiente para que as bactérias autotróficas possam se desenvolver para promover a nitrificação (METCALF & EDDY, 2016).

Já quando o filtro percolador é utilizado apenas para remoção de nitrogênio amoniacal, ou seja, para nitrificação terciária, o biofilme aderido ao meio suporte é mais fino e com elevada proporção de bactérias nitrificantes, podendo resultar em concentrações de  $\text{NH}_4^+$  de até 1,0 mg/l no efluente final, dependendo das temperaturas médias diárias ao longo do ano, atingindo, portanto, a nitrificação do efluente. Pode haver situações em que não se utiliza processo de decantação secundária justamente pela baixa espessura do biofilme e baixa produção de biomassa e pelo risco reduzido de perda de sólidos no efluente final (METCALF & EDDY, 2016).

Metcalf & Eddy (2016) citam que a nitrificação realizada em filtros percoladores apresenta vantagens relacionadas ao baixo consumo de energia, por ser um processo em que a aeração é promovida naturalmente, com operação simples

e desempenho estável. Como as taxas de aplicação hidráulica utilizadas são baixas, a recirculação é necessária para manter o meio suporte e o biofilme sempre úmidos.

O projeto de filtros percoladores para nitrificação deve considerar a área superficial específica do meio suporte, a intensidade da aeração natural e a possibilidade de utilizar ventilação mecanizada, as taxas de aplicação hidráulica e a recirculação, os efeitos adversos da presença da amônia em excesso e o controle de predadores do biofilme, como larvas e caramujos (METCALF & EDDY, 2016).

A taxa de nitrificação está relacionada à profundidade do meio suporte, que, por sua vez, pode variar com as concentrações de oxigênio e nitrogênio amoniacal no afluente e com a taxa de aplicação hidráulica. Ao longo da profundidade do filtro, quanto menos nitrogênio amoniacal disponível, menor é o crescimento das bactérias nitrificantes e menor é a taxa de nitrificação (METCALF & EDDY, 2016).

Quanto ao meio suporte e à área superficial específicos adequados para a nitrificação, a WEF (2011) indica a utilização de materiais que ofereçam mais área superficial específica, sendo sugerido  $138 \text{ m}^2/\text{m}^3$ .

Nos experimentos em escala reduzida, Medeiros (2011) analisou a ocorrência de nitrificação aplicando diferentes cargas orgânicas volumétricas e taxas de aplicação superficial em um filtro percolador precedido de sistema de lagoas anaeróbia e facultativa. A divisória vertical instalada no meio do filtro permitiu analisar a pedra brita e o plástico randômico sob efeito do mesmo afluente e das mesmas condições de distribuição. As cargas orgânicas volumétricas aplicadas foram de 0,06 a  $0,15 \text{ kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  em termos de DBO, conforme a faixa recomendada pela literatura para filtros de baixa taxa. Já as taxas de aplicação superficial foram de 4,2 a  $13,3 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ . As recomendações de literatura são de até  $4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  para filtros de baixa taxa, entre 4 e  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  para filtros de taxa intermediária e acima de  $10 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  para filtros de alta taxa. As taxas hidráulicas verificadas equivaleram, portanto, à faixa recomendada para filtros percoladores de taxa intermediária e alta taxa.

O estudo verificou eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal entre 82 e 63 % com meio suporte em pedra brita, sendo que a eficiência diminuiu conforme o aumento da carga orgânica volumétrica e o aumento da taxa de aplicação superficial, confirmando o que sugere a literatura. Já para o volume com meio suporte em plástico randômico, para a primeira situação com  $0,06 \text{ kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  em termos de DBO e  $4,2 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal foi baixa, de 47 %. Para as taxas equivalentes a um filtro percolador intermediário sugeridas pela literatura, de

0,09 a 0,12 kg/m<sup>3</sup>·d e 5,0 a 7,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, a parte do filtro preenchida pelo meio suporte plástico apresentou eficiência de 61 %, enquanto o meio suporte em pedra brita variou de 69 a 54 % (MEDEIROS, 2011).

Almeida (2007) observou as eficiências obtidas em um protótipo de filtro percolador como pós tratamento de reator anaeróbio, com variações de carga orgânica volumétrica e taxa de aplicação hidráulica, concluindo que para 0,20 a 0,24 kg/m<sup>3</sup>·d de DBO aplicada, a uma taxa de aplicação de 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, ocorreu nitrificação em todos os experimentos realizados, confirmando o que a literatura sugere como limite de 0,33 kg/m<sup>3</sup>·d de DBO de carga orgânica volumétrica aplicada para filtros de baixa taxa, com capacidade de nitrificação, e até 10 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d de taxa de aplicação hidráulica para filtros de taxa intermediária, com expectativa de nitrificação parcial. Já para 0,4 kg/m<sup>3</sup>·d de DBO aplicada e carga hidráulica de 20 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, valores indicados para filtros de alta taxa, sem capacidade de nitrificação, apenas 10 % das análises apresentaram concentração de nitrogênio amoniacal inferior a 20 mg/l.

Os caramujos, presentes no meio suporte, são identificados como predadores do biofilme, principalmente das bactérias nitrificantes, prejudicando a eficiência em filtros onde se deseja realizar a nitrificação. Em filtros percoladores em que ocorre a nitrificação, pode ocorrer, portanto, o crescimento excessivo de caramujos, resultando em redução da nitrificação (TIMPANY & HARRISON, 1989). O item 2.5.2.18 apresenta mais considerações sobre os caramujos e sobre como controlar o crescimento e a proliferação desse predador.

Quanto à desnitrificação em filtros percoladores, a DWA (2016) considera que nas camadas mais profundas do biofilme de um filtro percolador pode ser assumida uma certa desnitrificação simultânea. A partir da oxidação do carbono e da nitrificação combinadas, estima-se a obtenção de desnitrificação da ordem de 10 % da carga de nitrogênio total. Ao estabelecer a prática de recirculação, nitratos são adicionados, podendo ser estimada uma desnitrificação de até 40 % da carga de nitrogênio em filtros percoladores com material plástico de enchimento, principalmente para filtros de maior carga orgânica precedidos de decantadores primários e para fluxo livre de oxigênio. Ainda, se a água de recirculação for submetida a um estágio de pré-tratamento anóxico com alta capacidade de desnitrificação, a eliminação de nitrogênio total no filtro é correspondentemente reduzida a até 10% da carga de nitrogênio.

A DWA (2016) esclarece, no entanto, que devido aos inúmeros fatores influenciadores e à alta complexidade dos processos no biofilme de um filtro

percolador, não foi apresentado um cálculo concreto do desempenho da desnitrificação na referida publicação.

#### 2.5.2.18 Crescimento de moscas, insetos, vetores e caramujos

Protozoários, insetos, vermes e caramujos se alimentam da biomassa aderida ao meio suporte de um filtro percolador. Alguns deles estabelecem uma relação de equilíbrio com o objetivo de tratamento de efluentes, como alguns protozoários que se alimentam de bactérias livres que reduzem a turbidez do efluente e colaboram com o crescimento equilibrado do biofilme (TIMPANY & HARRISON, 1989).

Já outros organismos como os caramujos, desequilibram o funcionamento dos filtros percoladores, pois são predadores do biofilme, principalmente de bactérias nitrificantes. Em filtros percoladores em que ocorre a nitrificação, pode ocorrer, portanto, o crescimento excessivo de caramujos, que ao se estabelecerem como predadores das bactérias nitrificantes que compõem o biofilme, acabam por provocar a perda de eficiência no tratamento (TIMPANY & HARRISON, 1989).

Além de prejudicar o biofilme e a eficiência do tratamento, os caramujos podem causar obstrução de tubulações e danos em equipamentos. Daigger e Boltz (2011) sugerem a utilização de um poço de coleta de caramujos com peneira a montante da recirculação e do decantador secundário, possibilitando a remoção dos caramujos do efluente na saída do filtro. Nos decantadores secundários, os caramujos também podem ser separados do lodo descartado da mesma forma, também com o uso de peneiras.

O controle do crescimento de caramujos nos filtros pode ser feito por métodos que utilizam produtos químicos ou outras condições desfavoráveis à sobrevivência dos caramujos, incluindo tratamento alcalino, valores elevados de pH, dosagem de amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) acima de 150 mg/l, dosagem de água salina, cloração, dosagem de sulfato de cobre à concentração de 0,4 g/l, uso de metaldeído, niclosamida ou 4-trifenilmetil morfolina, inibindo o crescimento dos caramujos (WEF, 2011; Lacan *et al*, 2000). A aplicação desses inibidores de crescimento deve ser de curta duração, visando à preservação do biofilme e à manutenção da qualidade do efluente final (METCALF & EDDY, 2016).

### 2.5.3 Processos unitários a jusante do filtro percolador

#### 2.5.3.1 Decantadores secundários

Após o filtro percolador, o esgoto segue para a etapa de decantação secundária. Parte do efluente do filtro pode ser recirculado, conforme os objetivos de eficiência da ETE, visando à melhoria da qualidade do efluente final.

A principal função da etapa de decantação secundária é a retenção de sólidos do efluente dos filtros percoladores, obtendo efluente final com menor concentração de sólidos em suspensão. A principal diferença entre os decantadores secundários utilizados após filtros percoladores e os empregados após sistemas de lodos ativados é a menor concentração de sólidos no afluente para o sistema com filtro percolador, e o fato de não haver necessidade de adensamento ou recirculação de lodo (METCALF & EDDY, 2016).

Entre outros fatores, o mau desempenho de um sistema com filtros percoladores e decantadores secundários pode estar relacionado ao projeto inadequado dos decantadores. O uso de decantadores rasos, com profundidade de até 2,1 m, operando com taxa de aplicação superficial de 1,7 m/h, era recomendado anteriormente, porém estudos mais atuais comprovam a baixa eficiência nestas configurações. As taxas de aplicação média e máxima atualmente recomendadas pelo *Ten State Standards* (GLUMRB, 1997) para os decantadores secundários são inferiores a 0,092 e 0,182 m/h para projetos com nível da água entre 1,83 e 3,05 m, e 0,0278 e 0,556 m/h para nível da água entre 3,05 e 4,57 m (METCALF & EDDY, 2016).

A ABNT indica dimensionar os decantadores finais com taxa de aplicação superficial inferior a  $24 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ , profundidade superior a 3,5 m e taxa de vertedor inferior a  $380 \text{ m}^3/\text{m} \cdot \text{d}$  (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Por outro lado, estudos desenvolvidos por Metcalf & Eddy (2016) e por WEF (2000) sugerem decantadores de 3,0 a 3,5 m de profundidade. As taxas de aplicação superficial indicadas estão em concordância com as recomendadas por norma, entre 20 e  $24 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ .

Chernicharo (2001) e Von Sperling e Chernicharo (2005) apresentaram taxas de aplicação hidráulica para decantadores secundários empregados após filtros percoladores, para dois cenários, em função da remoção de matéria orgânica e da conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato, sendo o primeiro para

concentração do efluente final entre 20 e 30 mg/l em termos de DBO, sem nitrificação, e o segundo, para concentração inferior a 20 mg/l, com nitrificação. Os valores sugeridos por Von Sperling e Chernicharo (2005) podem ser verificados na Tabela 15.

Tabela 15 – Taxa de aplicação hidráulica para decantador secundário após filtro percolador

Tratamento	Taxa de aplicação superficial ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )	
	Para $Q_{\text{média}}$	Para $Q_{\text{máx}}$
DBO entre 20 e 30 mg/l (sem nitrificação)	<b>16 a 32</b>	<b>40 a 48</b>
DBO $\leq$ 20 mg/l (com nitrificação)	<b>16 a 24</b>	<b>32 a 40</b>

FONTE: Chernicharo (2001), Von Sperling e Chernicharo (2005).

Pesquisas realizadas por Chernicharo e Nascimento (2001) e Aisse *et al* (2001) em sistemas com filtros percoladores após reatores anaeróbios indicam concentrações médias de 30 mg/l em termos de DBO para taxa de aplicação superficial de até  $30 \text{ m}^3/\text{m}^2$  e cargas orgânicas volumétricas de até  $1 \text{ kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$  em termos de DBO em decantadores secundários (PROSAB, 2001).

#### 2.5.3.2 Filtros percoladores sem etapa de decantação secundária

Alguns estudos objetivaram avaliar filtros percoladores com diferentes materiais utilizados como meio suporte, como pós tratamento de reatores anaeróbios UASB, sem a etapa de decantação secundária. Almeida, Oliveira e Chernicharo (2011) analisaram a eficiência do sistema em termos da remoção de DBO, DQO e sólidos suspensos totais. Foram testados anéis plásticos, aparas de conduíte, espuma de poliuretano (sistema DHS) e escória de alto forno. Em condições de baixas cargas orgânicas volumétricas, o meio suporte de maior área superficial específica não proporcionou ganhos expressivos em termos de desempenho. O meio suporte com espuma de poliuretano, entretanto, oferece maior área superficial específica e apresentou eficiência significativamente maior quando comparada aos demais materiais.

Para filtros percoladores de altura até 2,5 m, implantados após reator anaeróbio UASB, o meio suporte em escória de alto forno, assemelhando-se à pedra brita ou pedra lava, é uma opção que não deve ser descartada. O meio suporte em espumas de poliuretano propiciou melhoria significativa na qualidade do efluente final. Neste estudo, o desempenho do sistema apresentou-se significativamente melhor em relação aos demais e com menor efeito da variação das taxas de aplicação superficial



e carga orgânica volumétrica na qualidade do efluente final. O sistema UASB seguido de filtro percolador com meio suporte com espuma de poliuretano, sem decantador secundário a jusante, foi capaz de promover o atendimento aos padrões de lançamento (ALMEIDA, OLIVEIRA E CHERNICHARO, 2011).

Foi observada menor produção de lodo nas fases operacionais de 0,32 a 0,47 kg de SST por kg de DQO removida, o que reforça a potencialidade de uso de espumas de poliuretano como material de enchimento para possibilitar a operação do sistema sem o uso de decantador secundário. A carga orgânica volumétrica foi mantida entre 0,30 e 0,40 kg/m<sup>3</sup>·d de DBO, em 50 a 80 % dos casos (ALMEIDA, OLIVEIRA E CHERNICHARO, 2011).

Almeida, Oliveira e Chernicharo (2011) afirmam que o adequado gerenciamento do lodo anaeróbico em sistema de filtro percolador sem decantação secundária é uma condição de especial prioridade, uma vez que as concentrações de sólidos suspensos totais no efluente final do filtro percolador tendem a ser bastante influenciadas pelo aporte de sólidos provenientes do reator UASB. Neste sentido, o estudo recomendou que as concentrações de sólidos suspensos no efluente do reator UASB devem estar confiavelmente abaixo de 100 mg/l.

O uso de reatores anaeróbios e filtros percoladores sem decantadores secundários parece ser uma promissora alternativa para a simplificação operacional da tecnologia, e uma importante estratégia para o tratamento de efluentes domésticos em países em desenvolvimento. No entanto, o sucesso do emprego desta tecnologia fica condicionado ao correto gerenciamento do lodo anaeróbico do reator UASB, a fim de que sejam evitadas sobrecargas nos filtros percoladores (ALMEIDA, OLIVEIRA E CHERNICHARO, 2011).

### 2.5.3.3 Filtros percoladores e lodos ativados combinados

Os sistemas de lodos ativados são constituídos por tanques aerados para promover reações microbiológicas, seguidos de unidades de decantação secundária. O sistema pode apresentar diferentes configurações e é dimensionado para que ocorra a recirculação de parte do lodo formado no decantador secundário, aumentando o tempo de detenção do lodo no processo, mantendo o material biológico ativo por mais tempo (METCALF & EDDY, 2016). No Quadro 4 estão apontadas as principais vantagens e desvantagens apresentadas por Metcalf & Eddy (2016).

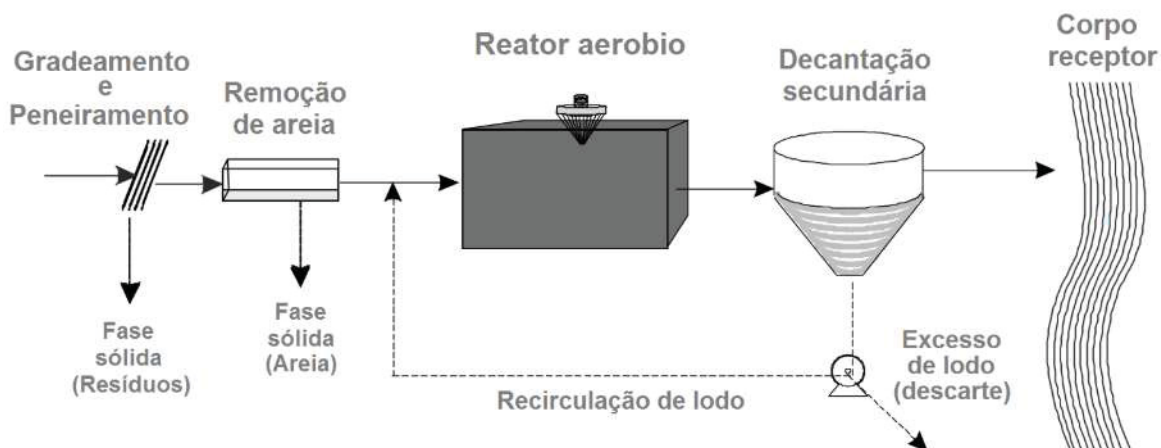
Quadro 4 – Principais vantagens e desvantagens por tipo de sistema de lodos ativados

	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Mistura completa	Adaptável a diversos afluentes; elevada capacidade de atenuação de cargas de choque ou tóxicas; demanda de O <sub>2</sub> uniforme; projeto simples; adequado para diferentes aeradores.	Susceptível à formação de lodo volumoso com filamentosas.
Aeração prolongada	Efluente de elevada qualidade; projeto e operação simples; capacidade de tratamento de efluentes com cargas variáveis e intermitentes; lodo estabilizado e baixa produção de bio sólidos.	Consumo elevado de energia; reatores grandes; potencial de formação de lodo volumoso.
Fluxo pistonado convencional	Adaptável para muitos esquemas de operação incluindo alimentação distribuída; projeto seletor e processos anóxico-aeróbio.	Projeto e operação complexos; compatibilização de suprimento e demanda de O <sub>2</sub> .
Alimentação distribuída	Distribuição de carga para uma demanda de O <sub>2</sub> mais uniforme; operação flexível e adaptável, incluindo processos aeróbios e anóxicos.	Projeto do processo e sistema de aeração mais complexos; dificuldade de monitoramento.

FONTE: Adaptado de Metcalf &amp; Eddy (2016).

Na Figura 14 está apresentado um fluxograma simplificado de uma estação de tratamento de esgoto composta por sistema de lodos ativados.

Figura 14 – Fluxograma simplificado de uma estação de tratamento de esgoto com lodos ativados



Fonte: Adaptado de Von Sperling e Chernicharo (2005).

Os sistemas de lodos ativados podem ser precedidos e complementados por processos físicos, biológicos e químicos, conforme a qualidade do efluente final exigida (METCALF & EDDY, 2016).

Enquanto o filtro percolador é definido como um processo de crescimento de biomassa aderida em meio suporte não submerso e com aeração natural, um sistema de lodos ativados é um processo de crescimento de biomassa em suspensão e com aeração forçada. A combinação dos dois processos unitários passou a ser utilizada para tratamento de efluentes industriais ou domésticos visando à obtenção dos máximos benefícios de cada processo, quanto à redução do consumo de energia com

o uso dos filtros percoladores, e quanto à qualidade do efluente tratado com o tratamento predominantemente aeróbio (METCALF & EDDY, 2016).

Dentre as possíveis configurações ao combinar filtros percoladores com sistemas de lodos ativados, verifica-se a utilização de decantadores intermediários entre os filtros percoladores e os tanques de aeração com biomassa em suspensão, além do decantador secundário ou final, após o tanque de aeração. Essa combinação é frequentemente utilizada em situações em que há alta carga orgânica, para melhorar o desempenho de um sistema de lodos ativados existente, reduzindo a carga orgânica a montante do tanque de aeração e promovendo a nitrificação no tanque de aeração. Os sistemas em série evitam a inibição de nitrificação no processo de lodos ativados devido à ocorrência de substâncias tóxicas no afluente, enquanto o decantador intermediário reduz a carga de sólidos e minimiza a energia e a vazão de ar utilizadas nos tanques de aeração do sistema de lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).

A combinação de filtros percoladores seguidos de lodos ativados, com ou sem decantação intermediária, reduz a aeração necessária para o tanque de lodos ativados, considerando que já ocorreu grande abatimento de carga à montante do tanque aerado (METCALF & EDDY, 2016).

A combinação de filtros percoladores e lodos ativados oferece vantagens quanto à estabilidade e resistência a cargas de choque ou a grandes variações de carga, eficiência volumétrica e baixo consumo de energia nos filtros percoladores, redução do volume do tanque de aeração do sistema de lodos ativados e da quantidade de energia necessária para promover a aeração forçada, melhoria na característica de sedimentação do lodo através de processo aderido, baixo índice volumétrico de lodo (IVL), obtenção de efluente de alta qualidade e redução do consumo de energia, aproveitando as vantagens oferecidas por cada um dos processos e minimizando as desvantagens (METCALF & EDDY, 2016).

Experiências que utilizaram filtros percoladores e lodos ativados combinados apontam a redução de 47 % da demanda total de oxigênio, redução de 30 % nos custos de energia em comparação com a utilização apenas de processo de lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).

## 2.5.4 Comparações entre filtros percoladores e lodos ativados

### 2.5.4.1 Parâmetros comparativos entre processos aeróbios com biomassa aderida e em suspensão (filtros biológicos e lodos ativados)

Estações de tratamento de esgoto compostas por reatores anaeróbios UASB seguidos de pós tratamento aeróbio geralmente permitem redução de 20 a 50 % dos custos de implantação, e redução superior a 50 % dos custos de operação, quando comparadas a estações convencionais de lodos ativados (ALÉM SOBRINHO E JORDÃO, 2001; VON SPERLING E CHERNICHARO, 2005; CHERNICHARO, 2006).

Os sistemas com lodos ativados podem apresentar maior eficiência de tratamento e flexibilidade de operação, em função da aeração forçada, além de menor área ocupada, se comparado a processos de filtração biológica, dependendo das taxas de aplicação realizadas. Por outro lado, a operação de sistemas de lodos ativados requer mão de obra mais especializada, demanda controle laboratorial completo e consome mais energia para o funcionamento do sistema, principalmente em função dos equipamentos para aeração dos tanques, além dos demais processos automatizados. Processos unitários de filtração biológica são de operação e manutenção mais simplificadas e demandam significativamente menos energia, já que operam com aeração natural (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Sistemas com filtros percoladores operando em baixa taxa, entre 0,07 e 0,25 kg/m<sup>3</sup>·d, podem obter eficiência de remoção de DBO de 85 a 90 %, semelhante à obtida em sistemas de lodos ativados (METCALF & EDDY, 2016).

Por outro lado, enquanto processos de filtração biológica suportam de 175 a 875 g/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO aplicada, sendo a população equivalente de 5 a 25 hab/m<sup>3</sup>; os sistemas de lodos ativados suportam de 1.800 a 3.600 g/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO aplicada, sendo a população equivalente de 50 a 100 hab/m<sup>3</sup>. Os valores apresentados são para sistemas de baixa e alta capacidade, respectivamente, por volume de filtro biológico ou volume de tanque de aeração (JORDÃO E PESSÔA, 2014).

Na Tabela 16, é apresentada uma síntese dos parâmetros supracitados, comparando filtros percoladores e sistemas de lodos ativados.

Tabela 16 – Parâmetros para comparação entre filtros percoladores e lodos ativados

Objetivo	Filtro percolador		Filtro Percolador <sup>(P)</sup>		Lodo Ativado convencional		Lodo Ativado aeração prolongada	
	Remoção de C e N	Remoção de C	Nitrificação total	Nitrificação parcial	Baixa capacidade	Alta capacidade	Baixa capacidade	Alta capacidade
DBO aplicada (g/m <sup>3</sup> .d)	<b>175</b> (3)	<b>875</b> (3)	(ND)	(ND)	<b>1.800</b> (3)	<b>3.600</b> (3)	(ND)	(ND)
População equivalente (hab)	<b>5</b> (3)	<b>25</b> (3)	(ND)	(ND)	<b>50</b> (3)	<b>100</b> (3)	(ND)	(ND)
Consumo de energia (kJ/m <sup>3</sup> )	<b>700</b> (1)	<b>1.200</b> (1)	(ND)	(ND)	<b>1.200</b> (1)	<b>1.700</b> (1)	<b>1.500</b> (1)	<b>1.900</b> (1)
Consumo de energia (kWh/m <sup>3</sup> )	<b>0,194</b> (1)	<b>0,333</b> (1)	<b>0,2-0,3</b> (2)	<b>&lt;0,15</b> (2)	<b>0,333</b> (1)	<b>0,472</b> (1)	<b>0,417</b> (1)	<b>0,528</b> (1)

Fonte: Adaptado de <sup>(1)</sup> WEF (2002); <sup>(2)</sup> Henrich e Maeggraff (2013); <sup>(3)</sup> Jordão e Pessoa (2014).

**Notas:** <sup>(P)</sup> Meio suporte plástico. <sup>(ND)</sup> Dado não disponível na literatura consultada.

Adicionalmente, no Quadro 5 é apresentada uma comparação qualitativa entre sistemas com filtros percoladores e sistemas de lodos ativados SBR (reator em batelada sequencial).

Quadro 5 – Comparação entre filtros percoladores de baixa taxa e sistema de lodos ativados SBR com aeração prolongada

Sistema / Parâmetro comparativo	Filtro percolador de baixa taxa	SBR com aeração prolongada
Remoção de DQO e DBO	Máximo possível	Máximo possível
Remoção de SST	Máximo possível	Máximo possível
Nitrificação	Máximo possível	Máximo possível
Desnitrificação	Pode ocorrer em filtros com altas taxas de recirculação <sup>(1)</sup>	Com restrições (depende da relação C:N)
Eliminação de P “natural”	Pode ocorrer em filtros com altas taxas de recirculação <sup>(1)</sup>	Com restrições (depende da relação C:N)
Produção de lodo	Baixo	Médio
Remoção de coliformes	Médio	Médio
Consumo de energia	Baixo	Elevado
Complexidade de operação	Médio	Elevado

Fonte: Adaptado de Hoffmann *et al.* (2007).

**Nota:** <sup>(1)</sup> Adicionado conforme funcionamento verificado em plantas de tratamento de esgoto com filtros percoladores com capacidade para desnitrificação e remoção biológica de fósforo parcial.

Jordão e Pessoa (2014) apontam vantagens e desvantagens ao comparar sistemas de lodos ativados com sistemas de filtros biológicos. Enquanto os lodos ativados podem apresentar maior eficiência de tratamento, maior flexibilidade de operação e menor área ocupada em relação aos filtros, a operação de sistemas de lodos ativados é mais delicada e exige conhecimento aprofundado dos processos biológicos e da tecnologia, dos equipamentos de automatização e dos procedimentos operacionais para manutenção do bom funcionamento, além de representarem

maiores custos de operação devido à necessidade de operação 24 horas e ao elevado consumo de energia em função dos equipamentos de aeração forçada.

Metcalf & Eddy (2016) apontam como principais vantagens dos filtros percoladores o menor consumo de energia, a operação simplificada, a obtenção de lodo com melhores características para adensamento, manutenção reduzida e melhor recuperação após ocorrência de cargas tóxicas.

WEF (2011) afirma ainda que muitas das desvantagens comumente atribuídas às ETEs com filtros percoladores estão relacionadas aos parâmetros de projeto aplicados e aos outros processos unitários à montante e à jusante do filtro, e não à capacidade de tratamento oferecida pelo filtro percolador em si.

#### 2.5.4.2 Eficiência energética

Ao comparar sistemas de lodos ativados e sistemas com filtros percoladores quanto ao consumo de energia, tem-se que sistemas de lodos ativados convencional demandam de 1.200 a 1.700 kJ/m<sup>3</sup> ou 0,333 a 0,472 kWh/m<sup>3</sup> e sistemas com aeração prolongada, de 1.500 a 1.900 kJ/m<sup>3</sup> ou 0,417 a 0,528 kWh/m<sup>3</sup>, enquanto para sistemas com filtração biológica com biomassa aderida, estima-se o consumo de 700 a 1.200 kJ/m<sup>3</sup> ou 0,194 a 0,333 kWh/m<sup>3</sup>, considerando energia necessária para recuperação de nível e recirculação de parte do efluente do filtro (WEF, 2002).

Para filtros percoladores com meio suporte plástico, que oferecem índices de vazios superiores a 97 %, o consumo de energia necessário aproximado é entre 0,2 e 0,3 kWh/m<sup>3</sup> para nitrificação total, ou seja, com concentração de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> inferior a 1,0 mg/l. Para nitrificação parcial, estima-se um consumo inferior a 0,15 kWh/m<sup>3</sup> (HENRICH e MAEGGRAFF, 2013).

Os estudos de Henrich e Marggraff (2013), analisaram a energia necessária por carga de DQO removida, a nitrificação obtida e a energia necessária por volume tratado, com nitrificação. Para as ETEs avaliadas, foram obtidos os valores de 0,16 e 0,35 kWh/kg de DQO e 0,11 e 0,057 kWh/m<sup>3</sup>, respectivamente, significativamente inferiores aos indicados pela literatura para processos aeróbios, indicando que os filtros percoladores podem representar grande economia de energia se comparados a outros processos de filtração biológica com biomassa aderida e aeração forçada, como filtros biológicos aerados submersos e sistemas de lodos ativados.

Silva e Rosa (2015) relacionam o consumo energético de sistemas com filtros percoladores e sistemas com lodos ativados, verificando o desempenho desejado ou obtido. Enquanto para filtros percoladores são apresentados os consumos de até 0,185 como “bom desempenho”, entre 0,185 e 0,231 como “desempenho aceitável” e acima de 0,231 kWh/m<sup>3</sup> como “desempenho ruim” da unidade de tratamento, para sistemas com lodos ativados, os valores que representam o consumo de energia por volume tratado são significativamente superiores, de até 0,280 para “bom desempenho”, de 0,280 a 0,350 para “desempenho aceitável” e acima de 0,350 kWh/m<sup>3</sup> para “desempenho ruim”.

#### 2.5.4.3 Comparativo de *Capex* e *Opex* para sistemas com filtros percoladores e com lodos ativados

Estudos de custos de implantação e operação, ou *Capex* e *Opex* (*capital expenditure* e *operational expenditure*) realizados por Kelvion (2017) comparam custos para sistemas com filtros percoladores e lodos ativados. Os cálculos consideraram um sistema de vazão média igual a 430 l/s e máxima igual a 680 l/s, com concentração DBO do esgoto afluente bruto igual a 370 mg/l e do efluente do UASB igual a 150 mg/l, sendo a carga do efluente do UASB igual a 5.573 kg/d. Para nitrogênio amoniacal, foi considerado afluente com 60 mg/l e 2.229 kg/d; para fósforo total, 7,5 mg/l e 279 kg/d; para sólidos suspensos totais, 175 mg/l e 6.592 kg/d. A temperatura do esgoto bruto adotada foi de 31 °C e o corpo receptor foi classificado como Classe II.

Os valores para implantação, operação e manutenção, incluindo consumo de energia, foram definidos a partir de estimativas e médias verificadas na literatura (VON SPERLING, 2012; ALÉM SOBRINHO E KATO, 1999; ALÉM SOBRINHO E JORDÃO, 2001; VON SPERLING *et al.*, 2001). Os estudos apontaram que o *Capex* para filtros percoladores é cerca de 78 % do *Capex* para um sistema de lodos ativados. A economia maior é verificada, entretanto, nos valores de *Opex* apresentados. O consumo energético de um sistema com filtros percoladores é cerca de 46 % menor, resultando em um balanço de *Capex* e *Opex* para 20 anos em que o valor aplicado para implantar e operar um sistema de filtros percoladores é aproximadamente 37 % do valor para implantar e operar um sistema com lodos ativados, conforme indicado na Tabela 17.



Tabela 17 – Estimativas de *Capex* e *Opex* para filtros percoladores e lodos ativados

		LA	FP	FP:LA
<b>CAPEX</b>	Implantação total (milhões R\$)	36,765	28,794	78,32%
	Custo energético (20 anos) (milhões R\$)	54,620	25,362	46,43%
<b>OPEX</b>	Custo mão de obra especializada (20 anos) (milhões R\$)	53,740	-	-
<b>CAPEX + OPEX (20 anos) (milhões R\$)</b>		<b>145,125</b>	<b>54,156</b>	<b>37,32%</b>

Fonte: Kelvion (2017).

**Nota:** A estimativa de custo de mão de obra refere-se ao custo com mão de obra especializada, sendo atribuído valor apenas para os sistemas de lodos ativados, que demandam operação especializada 24 h, desconsiderando os custos de operação simplificada em turno de 8h necessários para operação de sistemas com filtros percoladores.

Corrêa *et al.* (2017) também realizaram uma análise de *Capex* e *Opex* semelhante e concluíram que quando se utiliza meio suporte plástico, o *Capex* do filtro percolador é cerca de 15 % maior se comparado ao do sistema de lodos ativados. Por outro lado, ao longo de 20 anos de operação, o equilíbrio entre *Capex* e *Opex* aponta que o valor aplicado para implantar e operar um sistema de filtros percoladores é aproximadamente 75 % do valor para implantar e operar um sistema com lodos ativados, conforme indicado na Tabela 18.

Tabela 18 – Estimativas de *Capex* e *Opex* para filtros percoladores e lodos ativados

		LA	FP	FP:LA
<b>CAPEX</b>	Implantação total (milhões R\$)	<b>3,200</b>	<b>3,685</b>	<b>115,16%</b>
	Custo energético (20 anos) (milhões R\$)	<b>2,816</b>	<b>1,094</b>	<b>38,85%</b>
<b>OPEX</b>	Custo mão de obra especializada (20 anos) (milhões R\$)	<b>10,107</b>	<b>7,367</b>	<b>72,89%</b>
<b>CAPEX + OPEX (20 anos) (milhões R\$)</b>		<b>16,123</b>	<b>12,146</b>	<b>75,33%</b>

Fonte: Corrêa *et al.* (2017).

## 2.6 SWOT - FERRAMENTA DE GESTÃO E PLANEJAMENTO

*SWOT* é uma ferramenta clássica da Administração e não possui um criador definido. Atribui-se a criação do *SWOT* a professores da Universidade de *Stanford* que desenvolveram o método a partir da análise das 500 maiores empresas dos Estados Unidos da América na década de 60 (SEBRAE, 2016).

A sigla *SWOT* vem das palavras *Strenghts* (forças), *Weaknesses* (fraquezas), *Opportunities* (oportunidades), e *Threats* (ameaças). Esses quatro pontos definem as linhas de análise e são a base dessa ferramenta aplicada principalmente no planejamento estratégico de organizações, proporcionando a sistematização de

informações em uma boa base para tomada de decisões, elaboração de propostas de negócios, elaboração de planejamento estratégico e direcionamento de organizações (KOTLER E ARMSTRONG, 1993).

A análise da Matriz SWOT se dá ao estabelecer relações lógicas entre os fatores externos e internos à organização, ou seja, entre oportunidades e ameaças externas e pontos fortes e fracos internos (CHIAVENATO E SAPIRO, 2003).

Os pontos fortes de uma organização podem ser elencados como experiências, qualidade de recursos humanos e financeiros, certificações, capacidade de gestão, marketing, pesquisas, entre outros. Tudo que colabora com que a organização cresça, desenvolva e obtenha sucesso em sua área (FINE, 2011).

Já dentro dos pontos fracos, elencam-se os itens que são uma desvantagem ou limitação da organização em relação a seus concorrentes ou cenário atual, tais como baixa reputação, falta de continuidade de ações, falta de liderança, compromisso ou ainda capacitação (FINE, 2011).

As oportunidades são pontos externos positivos que propiciam possibilidades de atuação, tais como tecnologia e informação, novos nichos a serem explorados, desenvolvimento de novas táticas e *benchmarking* (FINE, 2011).

Por fim, as ameaças são pontos que estão fora de controle da empresa, de impacto negativo sobre a organização, tais como ambiente econômico, variações climáticas, novas tecnologias, mudanças de legislação, entre outras (FINE, 2011).

Müller (2003) propõe interpretações possíveis da análise SWOT, a partir de uma análise cruzada dos quatros quadrantes desenvolvidos na Matriz SWOT. O caso de associação entre ameaças externas e pontos fracos, por exemplo, indica a necessidade de sobrevivência, devendo a organização planejar a reversão deste cenário com uma estratégia defensiva. Já a relação entre pontos fortes e oportunidades sugere um rápido crescimento ou desenvolvimento daquele item em análise com uma estratégia ofensiva. O encontro entre pontos fracos e oportunidades indica necessidade de uma estratégia de reforço, a fim de minimizar possíveis perdas de oportunidades por falhas no ambiente interno. O cruzamento entre ameaças e pontos fortes pode representar estratégia de confronto, em que a empresa tem posição de liderança, sendo um cenário que permite agir com os pontos fortes visando eliminar ameaças externas.

A análise da Matriz SWOT enfatiza, assim, o princípio básico de que a estratégia deve produzir um bom ajuste entre as competências internas da

organização, traduzidas em pontos fortes e fracos, e as circunstâncias e variáveis externas, refletidas em parte por suas oportunidades e ameaças, utilizando-se da combinação entre fatores internos e externos para potencializar pontos fortes e oportunidades e para minimizar pontos fracos e ameaças (JUNQUEIRA, 2006).

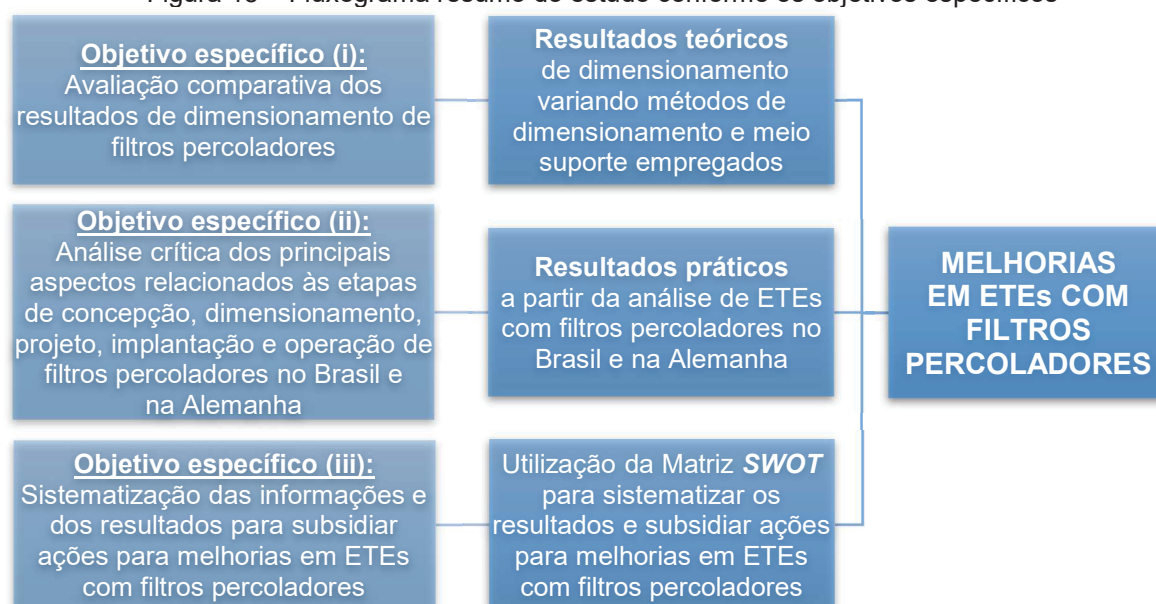
### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

As discussões realizadas neste estudo foram motivadas por dificuldades e questionamentos relacionados às etapas de (i) concepção, (ii) dimensionamento, (iii) projeto, (iv) implantação, (v) operação e (vi) manutenção de filtros percoladores.

O estudo buscou relacionar os conceitos teóricos e as experiências práticas observadas em estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores de diferentes portes em operação no Brasil e na Alemanha, objetivando à proposição de ações para melhorias em sistemas com filtros percoladores, abrangendo todas as etapas relacionadas, da concepção à operação e manutenção dos filtros e dos processos a montante ou a jusante que interferem no bom funcionamento de um filtro percolador.

O fluxograma apresentado na Figura 15 ilustra o agrupamento das atividades realizadas relacionadas a cada objetivo específico, de forma resumida, convergindo para o objetivo geral do estudo de melhorias em estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores.

Figura 15 – Fluxograma resumo do estudo conforme os objetivos específicos



FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.

Nos itens 3.1, 3.2 e 3.3 estão descritas todas as definições e sequências de atividades realizadas para o desenvolvimento dos três objetivos específicos definidos.

### 3.1 DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA AVALIAR COMPARATIVAMENTE OS RESULTADOS DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES

Para cumprir o primeiro objetivo específico de avaliar comparativamente os resultados de dimensionamento, foram realizadas simulações teóricas de dimensionamento de filtros percoladores, combinando a utilização de diferentes equações e métodos de dimensionamento e diferentes materiais empregados como meio suporte para dois objetivos de tratamento.

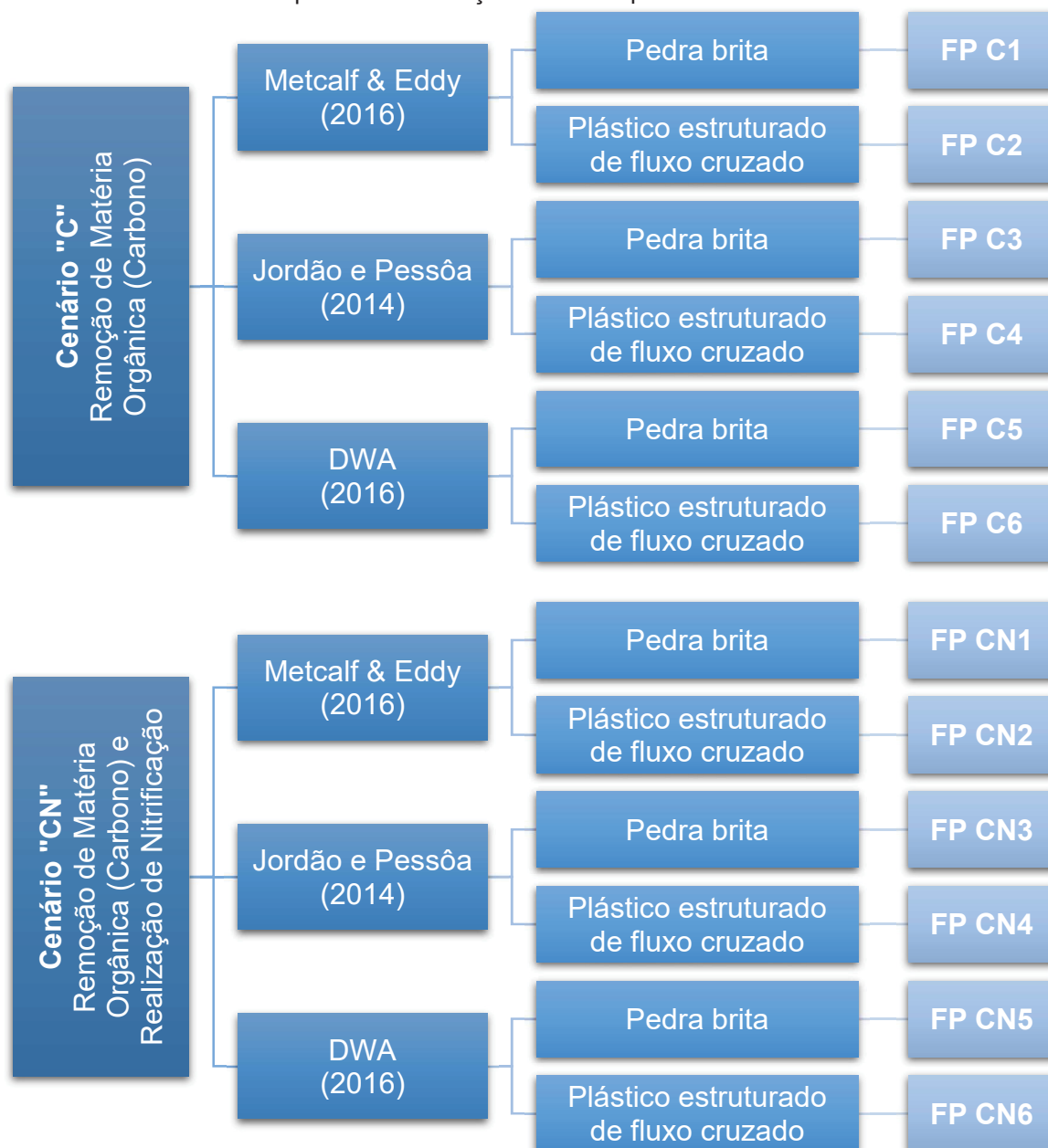
Para definir para quais objetivos de tratamento seriam realizadas as simulações de dimensionamento, foram considerados os dois principais objetivos em que são empregados filtros percoladores para tratamento de esgoto de características predominantemente domésticas. O primeiro objetivo é a remoção de carbono ou matéria orgânica, nesse estudo identificado como cenário “C”. O segundo objetivo é a remoção de carbono combinada à conversão de nitrogênio e à realização de nitrificação no mesmo filtro, nesse estudo identificado como cenário “CN”.

Para definir a utilização de diferentes equações e métodos de dimensionamento de filtros percoladores, foi realizado um levantamento das equações, dos métodos, sequências de cálculo, critérios e parâmetros disponíveis na literatura nacional e internacional.

Para definir quais materiais seriam adotados como meio suporte nos cálculos de simulação de dimensionamento, foram identificados aqueles mais citados na literatura, em estudos acadêmicos e mais comumente utilizados como meio suporte.

No fluxograma exposto na Figura 16, estão representadas as combinações entre equações e métodos de dimensionamento estudados e materiais empregados como meio suporte, sendo as equações agrupadas conforme as literaturas verificadas, Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014) e DWA (2016), combinadas com a pedra brita e o plástico estruturado de fluxo cruzado como meio suporte. O planejamento de simulações a serem realizadas resultou, assim, em 12 combinações, sendo seis para o cenário “C” e 6 para o cenário “CN”, identificando os filtros percoladores de “FP C1” a “FP C6” e de “FP CN1” a “FP CN6”.

Figura 16 – Combinações de objetivos de tratamento, métodos de dimensionamento e materiais utilizados como meio suporte e identificação dos filtros percoladores a serem dimensionados



FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> "FP" refere-se a filtro percolador, "C" refere-se ao cenário para remoção de matéria orgânica (carbono) e "CN" ao cenário para remoção de matéria orgânica (carbono) combinada à realização de nitrificação no mesmo filtro. <sup>(2)</sup> O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.

Os subitens a seguir detalham as definições e as sequências de atividades derivadas do fluxograma de combinações para a simulação de dimensionamento apresentado na Figura 16.

### 3.1.1 Definições quanto aos objetivos de tratamento dos filtros percoladores

Os filtros percoladores podem ser empregados em uma ETE objetivando à remoção de carbono ou matéria orgânica e à conversão de nitrogênio, promovendo a nitrificação e até mesmo a desnitrificação do efluente, quando adaptados para promover ambiente anóxico. Um filtro percolador também pode ser dimensionado para que a remoção de carbono e a conversão de nitrogênio ocorram de forma combinada, no mesmo filtro.

Foram estabelecidos dois cenários, sendo o primeiro apenas para remoção de carbono, chamado de cenário “C”, e o segundo para remoção de carbono e conversão de nitrogênio, chamado de cenário “CN”.

A qualidade desejada para o efluente nos cenários “C” e “CN” está diretamente relacionada aos objetivos para os quais os filtros foram dimensionados. Para definir as concentrações limites para DBO, DQO e  $\text{NH}_4^+$ , foram utilizados limites de referência estabelecidos em legislações que regulamentam o lançamento de efluentes em corpos hídricos, simulando uma outorga de direito para um cenário menos restritivo, “C”, e para um cenário mais restritivo, “CN”, este com exigências também quanto à concentração de nitrogênio amoniacal no efluente final.

Na Tabela 19 estão apresentados os limites máximos de concentração de DQO, DBO e nitrogênio amoniacal definidos para os cenários “C” e “CN”.

Tabela 19 – Definição da qualidade do efluente final para os cenários “C” e “CN”

	DQO (mg/l)	DBO (mg/l)	$\text{NH}_4^+$ (mg/l)
<b>Cenário “C”</b>	160 <sup>(1)</sup>	< 40 <sup>(2)</sup>	- <sup>(3)</sup>
<b>Cenário “CN”</b>	20 <sup>(4)</sup>	5 <sup>(5)</sup>	< 1 <sup>(6)</sup>

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> Valor estimado em função da concentração de DBO e da relação DQO/DBO igual a 4. <sup>(2)</sup> Valor definido pelo autor do estudo, considerando 40 mg/l como um limite médio de outorgas de lançamento (valor exige tratamento aeróbio e é mais restritivo em relação a 90 mg/l, limite exigido minimamente pelo Estado do Paraná por meio da Resolução SEMA 021/2009 quando não há licença ambiental vigente para a ETE), e menos restritivo em relação ao cenário “CN” que exige nitrificação. <sup>(3)</sup> Limite não definido, pois o cenário “C” não objetiva a realização de nitrificação. <sup>(4)</sup> Valor definido a partir da estimativa de concentração em que a atividade autotrófica é predominante, conforme definido pela DWA (2016). <sup>(5)</sup> Valor estimado em função da concentração de DQO e da relação DQO/DBO igual a 4. <sup>(6)</sup> Valor que caracteriza a realização da nitrificação do efluente.

Para o cenário “C”, a principal condição é que a concentração de DBO seja inferior a 40 mg/l, enquanto para o cenário “CN”, a principal condição é que a concentração de  $\text{NH}_4^+$  seja inferior a 1 mg/l, caracterizando a nitrificação. A simulação de dimensionamento dos filtros percoladores utilizou, portanto, tais concentrações de



DBO, DQO e nitrogênio amoniacal estabelecidas para os cenários “C” e “CN” como limites máximos a serem verificados no efluente final. As seções para cada simulação foram realizadas visando à obtenção de tais concentrações, alterando principalmente o volume útil do filtro, a taxa de aplicação hidráulica, a carga orgânica volumétrica e a recirculação do efluente, ou seja, as variáveis manipuláveis, conforme as equações empregadas, mantendo sempre os mesmos processos a montante e as mesmas características do afluente ao filtro.

### 3.1.2 Definições quanto à composição da ETE

Os processos unitários que compõem a ETE considerada para os cálculos de simulação realizados nesse estudo foram definidos conforme a composição das ETEs com filtros percoladores no Paraná, para que o estudo fosse adequado, significativo e aplicável à realidade do Estado.

Assim, as simulações consideraram uma ETE composta por gradeamento, desarenador, reator anaeróbio, filtro percolador e decantador secundário, atribuindo ao afluente ao filtro percolador as características típicas de um efluente de reator anaeróbio.

Quanto à definição do porte da ETE a ser considerada nas simulações, foi definida uma ETE de médio porte, atribuindo, assim, uma vazão afluente igual a 20.000 m<sup>3</sup>/d, ou 231 l/s, sendo a capacidade compatível com uma população equivalente de cerca de 165.000 habitantes.

### 3.1.3 Definições quanto à caracterização do esgoto afluente ao filtro percolador

Para os cálculos de dimensionamento, foi necessário caracterizar o afluente ao filtro. As características qualitativas foram definidas considerando valores típicos de esgoto bruto doméstico sugeridos por Von Sperling e Chernicharo (2005), apresentados na Tabela 1, item 2.2.1, e considerando que os reatores anaeróbios oferecem uma eficiência média estimada de 50 % para remoção de DQO e de 60 % para remoção de DBO, em concordância com as médias sugeridas por Von Sperling e Chernicharo (2005) e por Jordão e Pessoa (2014).

A caracterização qualitativa do afluente ao filtro percolador, já considerando a eficiência estimada obtida com o reator anaeróbio, está disposta na Tabela 20.

Tabela 20 – Caracterização do afluente ao filtro percolador			
Variáveis		Valor adotado	un.
Caracterização do afluente ao filtro percolador	DQO <sub>afluente,FP</sub>	<b>300</b>	(mg/l)
		<b>6.000</b>	(kg/d)
	DBO <sub>afluente,FP</sub>	<b>120</b>	(mg/l)
		<b>2.400</b>	(kg/d)
	ST <sub>afluente,FP</sub>	<b>1.100</b>	(mg/l)
		<b>22.000</b>	(kg/d)
	NTK <sub>afluente,FP</sub>	<b>45</b>	(mg/l)
		<b>900</b>	(kg/d)
	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sub>afluente,FP</sub>	<b>25</b>	(mg/l)
		<b>500</b>	(kg/d)

FONTE: O Autor (2017).

### 3.1.4 Definições quanto aos métodos de dimensionamento

As equações e sequências de cálculo foram levantadas utilizando referências clássicas e modernas. Foram escolhidas duas referências clássicas revisadas recentemente, sendo uma internacional, Metcalf & Eddy (2016), e uma nacional, Jordão e Pessoa (2014). Foi estudada ainda uma referência internacional moderna, publicada pela DWA (2016), que apresentou uma revisão das equações existentes para dimensionamento de filtros percoladores para implantação em zonas tropicais, temperadas e frias, conferindo característica internacional e de inovação à publicação e aos métodos de dimensionamento de vários processos unitários de tratamento de esgoto, incluindo os filtros percoladores.

Foram levantadas e estudadas as equações propostas nas referências de literatura utilizadas. As equações de dimensionamento consideradas por Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014) e DWA (2016) estão apresentadas nos itens de Revisão de Literatura, 2.5.2.2, 2.5.2.3 e 2.5.2.4, respectivamente.

Já no item 2.5.2.5, foram apresentados quadros resumo que agruparam as equações e variáveis levantadas, separadas conforme o objetivo de tratamento do filtro percolador, ou seja, foram agrupadas as equações que estimam a remoção de carbono e as equações que estimam a conversão de nitrogênio e a realização de nitrificação, aplicáveis aos cenários “C” e “CN” estabelecidos no estudo.

A apresentação de todas as equações e variáveis de cálculo em quadros resumo supracitados permitiu ainda observar a evolução das equações para dimensionamento de filtros percoladores ao longo das últimas décadas considerando as variáveis utilizadas em cada equação, analisando quais variáveis não eram consideradas e passaram a fazer parte dos cálculos de dimensionamento de filtros

percoladores à medida que se estabelecia uma nova equação ou uma revisão de equação já definida.

Uma vez analisadas as variáveis consideradas em cada equação, ao comparar os resultados foi possível supor se a utilização de uma variável no cálculo influencia significativamente ou não o dimensionamento, bem como supor se a utilização de uma variável faz com que o resultado represente de forma mais próxima à realidade o que acontece nos modelos em escala operacional.

### 3.1.5 Definições quanto aos materiais a serem utilizados como meio suporte

Quanto aos materiais a serem utilizados como meio suporte, foram escolhidos a pedra brita e o plástico estruturado de fluxo cruzado. O primeiro por ser largamente utilizado no Brasil e nas ETEs analisadas e visitadas no Paraná, e o segundo, por ser um material que caracteriza inovação no cenário nacional e por estar sendo iniciada sua utilização no Paraná. Cabe ressaltar que, apesar de recentemente iniciada sua utilização no Paraná, os materiais plásticos já são estudados e utilizados internacionalmente desde a década de 60.

A escolha dos materiais foi motivada ainda pela necessidade de materiais alternativos à pedra brita e que possam representar ganho de eficiência no tratamento, conforme sugerem diversas experiências internacionais publicadas e relatadas.

Para os dois materiais escolhidos, foram levantadas as principais características físicas como área superficial específica, índice de vazios, massa específica aparente, altura máxima possível para compor um filtro percolador e vantagens e desvantagens relacionadas a estas características. Este levantamento está apresentado no item 2.5.2.9.

A pedra brita considerada para os cálculos de simulação de dimensionamento de filtros percoladores foi a nº 4, de faixa granulométrica entre 50 mm e 76 mm (ABNT, 1993), com área superficial específica igual a  $50 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , massa específica igual a  $1.400 \text{ kg}/\text{m}^3$  e índice de vazios de 50 %.

Já para o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado a  $60^\circ$ , foi adotada área superficial específica igual a  $150 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , massa específica igual a  $80 \text{ kg}/\text{m}^3$  e índice de vazios superior a 97 %.

Ressalta-se que todos os valores foram adotados em concordância às faixas sugeridas pela literatura revisada, conforme apresentado no item 2.5.2.9, sendo que

para a área específica e para o índice de vazios foram adotados valores médios de literatura para cada material, e que para a massa específica, os valores adotados representam a pior situação para ambos os materiais.

A definição da altura útil do meio suporte variou em função do objetivo do filtro e do material utilizado como meio suporte.

Para o cenário “C”, com operação do filtro em alta taxa, adotou-se, na primeira seção de cada simulação, a altura máxima recomendada para pedra brita, de 3 m, tanto para a brita quanto para o plástico estruturado. Posteriormente, nas últimas seções realizadas, a altura para o filtro em meio suporte plástico foi alterada para 6 m, uma vez que esse material permite aumentar a altura útil do filtro em até 12 m.

Para o cenário “CN”, com operação do filtro em baixa taxa, foi adotada a mesma lógica, realizando as simulações de dimensionamento com a altura máxima de 2,5 m, recomendada para brita, nas primeiras seções de cálculo. Na última seção, a altura atribuída ao meio suporte plástico estruturado foi igual a 6 m, sendo essa uma altura intermediária em que já é possível obter nitrificação.

Apesar de a altura máxima possível para plástico estruturado ser de 12 m, foi adotado um valor intermediário, considerando que filtros de 12 m implicariam em uma alteração muito significativa do perfil hidráulico, implicando em grandes alterações em ETEs existentes, por exemplo.

### 3.1.6 Definição das taxas de aplicação hidráulica e das cargas orgânicas volumétricas

A literatura apresenta valores mínimos e máximos para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica para filtros percoladores com meio suporte em pedra brita operando em regime de alta taxa e de baixa taxa. Os valores mínimos e máximos variam entre as referências verificadas para a elaboração do presente estudo. Tais variações devem ser oriundas de fatores locais e empíricos, de tal forma que para definir a taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica médias a serem utilizadas nesse estudo, atribuídas na primeira seção das simulações de dimensionamento, foram considerados os menores e maiores valores verificados em literatura, conforme apresentado na Tabela 6, item 2.5.2.7, resultando em uma faixa cujos limites incluem os valores sugeridos por todas as literaturas consultadas.

Na Tabela 21 está apresentado um resumo dos valores verificados em literatura e os valores médios obtidos, utilizando as premissas supracitadas.

Tabela 21 – Definição dos valores médios para taxa de aplicação hidráulica e para carga orgânica volumétrica a partir das faixas de valores sugeridos pela literatura

		Pedra brita			Plástico estruturado		
		Mínima	Média	Máxima	Mínima	Média	Máxima
<b>Alta taxa</b>	TAH ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )	4,0	<b>27,0</b>	50,0	10,0	<b>42,5</b>	75,0
	COV ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )	0,4	<b>1,1</b>	1,8	0,5	<b>1,75</b>	3,0
<b>Baixa taxa</b>	TAH ( $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$ )	1,0	<b>3,0</b>	5,0	(ND)	(ND)	(ND)
	COV ( $\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$ )	0,08	<b>0,24</b>	0,4	(ND)	(ND)	(ND)

FONTE: Adaptado de Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014), ABNT (2011), Von Sperling e Chernicharo (2005), WEF (1992), WEF (2000), CHERNICHARO (2001).

**Nota:** (ND) Dado não disponível em literatura.

Para meio suporte plástico, são apresentados apenas valores mínimos e máximos para operação em alta taxa e alta carga, não sendo possível estabelecer taxa e carga médias para filtros com meio suporte plástico operando em regime de baixa taxa ou baixa carga a partir de indicações de literatura.

A não determinação desses valores mínimos e máximos na literatura pode estar relacionada ao fato de o meio suporte plástico, por oferecer maior área superficial específica, não ser adequado à aplicação de taxas hidráulicas e cargas orgânicas reduzidas. O efeito da aplicação de baixas taxas e cargas pode ser a baixa eficiência de molhamento da superfície disponível e o consequente baixo desenvolvimento do biofilme, resultando em uma eficiência aquém do esperado em função do baixo aproveitamento da área superficial específica oferecida pelo meio suporte.

Matematicamente, seria possível estimar valores médios para a taxa de aplicação hidráulica e para a carga orgânica volumétrica para operar filtros percoladores com meio suporte plástico em baixa taxa e carga. No entanto, a dinâmica de funcionamento de um filtro percolador envolve relações biológicas que não são facilmente estabelecidas apenas a partir de relações matemáticas diretas, se não por relações estabelecidas empiricamente a partir de estudos dedicados.

Considerando que não há recomendação de aplicação de baixas taxas hidráulicas e cargas orgânicas volumétricas quando se utiliza meio suporte plástico estruturado com elevada área superficial específica, nas simulações de

dimensionamento para o cenário “CN” foram consideradas apenas as taxas e cargas recomendadas pela literatura, iguais às utilizadas para o cenário “C”.

### 3.1.7 Resumo da caracterização do esgoto e das variáveis adotadas para simulação de dimensionamento

A Tabela 22 resume todas as variáveis de projeto e de operação adotadas, apresentando as variações conforme o cenário e o meio suporte adotado.

Tabela 22 – Variáveis de projeto e de operação adotadas			
	Variáveis	Valor adotado	un.
Variáveis de projeto	Vazão	231	(l/s)
		20.000	(m <sup>3</sup> /d)
	Temperatura do esgoto afluente	22 <sup>(1)</sup>	(°C)
	Área superficial da pedra brita A <sub>sup,Brita</sub>	50	(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
	Área superficial do plástico estruturado A <sub>sup,Plástico</sub>	150	(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )
	Altura útil da brita para o cenário C h <sub>útil,Brita,Cenário"C"</sub>	3,0	(m)
	Altura útil da brita para o cenário CN h <sub>útil,Brita,Cenário"CN"</sub>	2,5	(m)
	Altura útil plástico para o cenário C h <sub>útil,Plástico,Cenário"C"</sub>	3,0	(m)
	Altura útil plástico para o cenário CN h <sub>útil,Plástico,Cenário"CN"</sub>	6,0	(m)
	Diâmetro interno do filtro	Variável	(m)
Parâmetros para caracterização do afluente ao filtro percolador	DQO <sub>afluente,FP</sub>	300	(mg/l)
		6.000	(kg/d)
	DBO <sub>afluente,FP</sub>	120	(mg/l)
		2.400	(kg/d)
	NTK <sub>afluente,FP</sub>	45	(mg/l)
		900	(kg/d)
Taxas de operação para a primeira seção de simulações	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> <sub>afluente,FP</sub>	25	(mg/l)
		500	(kg/d)
	Taxa de aplicação hidráulica TAH <sub>Brita,Cenário"C"</sub>	27,0 <sup>(2)(4)</sup>	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)
	Carga orgânica volumétrica COV <sub>Brita,Cenário"C"</sub>	0,75 <sup>(2)(4)</sup>	(kg/m <sup>3</sup> ·d) (DBO)
	Taxa de aplicação hidráulica TAH <sub>Brita,Cenário"CN"</sub>	3,0 <sup>(2)(4)</sup>	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)
	Carga orgânica volumétrica COV <sub>Brita,Cenário"CN"</sub>	0,24 <sup>(2)(4)</sup>	(kg/m <sup>3</sup> ·d) (DBO)
	Taxa de aplicação hidráulica TAH <sub>Plástico,Cenário"C",Cenário"CN"</sub> <sup>(3)</sup>	42,5 <sup>(2)(4)</sup>	(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)
	Carga orgânica volumétrica COV <sub>Plástico,Cenário"C",Cenário"CN"</sub> <sup>(3)</sup>	1,75 <sup>(2)(4)</sup>	(kg/m <sup>3</sup> ·d) (DBO)

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(C)</sup> Refere-se aos parâmetros de projeto e taxas e cargas de operação adotadas para os cenários “C”. <sup>(CN)</sup> Refere-se aos parâmetros de projeto e taxas e cargas de operação adotadas para o cenário “CN”. <sup>(1)</sup> Valor definido a partir de valores medianos verificados nas ETEs com filtros percoladores analisadas no Paraná, com dados de janeiro de 2017 a abril de 2018. <sup>(2)</sup> Valores definidos a partir de valores médios recomendados em literatura. <sup>(3)</sup> A literatura não apresenta sugestão de valores para

filtros com meio suporte plástico operando em “baixa taxa”.<sup>(4)</sup> Para a primeira seção de simulações, os valores adotados são os apresentados nessa tabela, porém a partir da segunda seção, os valores de taxa de aplicação hidráulica e de carga orgânica volumétrica são variáveis, adequando o dimensionamento à eficiência desejada para os filtros percoladores.

### 3.1.8 Sequência de atividades para simulação de dimensionamento

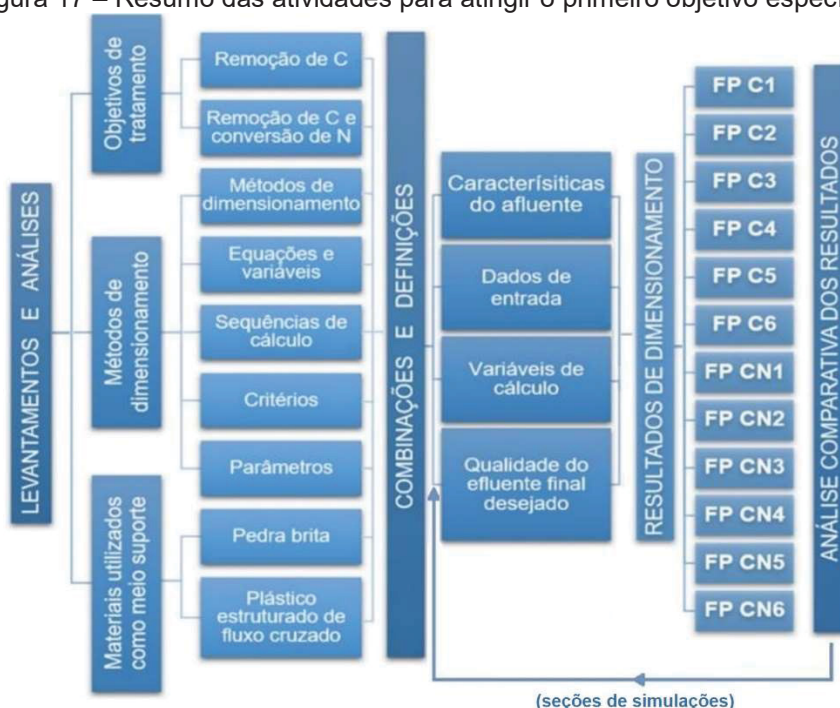
Definidas todas as equações a utilizar e variáveis que influenciam o dimensionamento de filtros percoladores, foram realizados os cálculos de simulação.

Para tal, foram elaboradas planilhas de cálculo para cada método de dimensionamento e foram inseridos os dados de entrada e para obter os resultados provenientes de cada equação.

O estudo realizou a comparação entre os resultados de dimensionamento em termos de volume de meio suporte total necessário, sendo essa variável definida por esse estudo como a mais significativa para comparar os resultados de dimensionamento, citando as concentrações obtidas em termos de DQO ou DBO e de nitrogênio amoniacal, atentando ao cumprimento dos objetivos de remoção de carbono e de realização de nitrificação definidos para os cenários “C” e “CN”.

O fluxograma na Figura 17 ilustra e resume a sequência de atividades definidas e realizadas para cumprir o primeiro objetivo específico proposto.

Figura 17 – Resumo das atividades para atingir o primeiro objetivo específico



FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.



Ao fixar valores para a taxa de aplicação hidráulica e para a carga orgânica volumétrica para brita e plástico estruturado, para filtros percoladores em alta e baixa taxa e aplicar as equações na primeira seção de simulações, era esperado que os resultados para as 12 simulações variassem em termos de volume e de eficiência, sendo que em alguns casos as eficiências obtidas não seriam suficientes para atingir os limites máximos de lançamento propostos para os cenários “C” e “CN” nas taxas e cargas previamente estabelecidas, o que motivou a simulação com mais seções para os 12 cálculos realizados.

Na primeira seção, portanto, a simulação utilizou as taxas de aplicação hidráulica e as cargas orgânicas volumétricas previamente estabelecidas, possibilitando realizar considerações acerca das variáveis utilizadas e dos volumes obtidos.

Para os casos em que as concentrações mínimas desejadas não foram obtidas, bem como para os casos em que os valores obtidos foram significativamente inferiores às concentrações mínimas, ou seja, caracterizando uma situação de superdimensionamento, foram realizadas as demais seções visando à obtenção de valores próximos às concentrações limites estabelecidas.

A partir da segunda seção, os dimensionamentos foram ajustados para atingir os limites de lançamento propostos para os cenários “C” e “CN”, variando as taxas de aplicação hidráulica, cargas orgânicas volumétricas, altura útil do meio suporte e a recirculação do efluente.

As seções realizadas com a variação da altura do meio suporte plástico estruturado de 3 para 6 m e com a variação da razão de recirculação de 0,0 para 0,5, objetivaram verificar o efeito do aumento da altura útil do meio suporte plástico e os efeitos da recirculação, quanto às concentrações finais e volumes obtidos.

### 3.2 DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA ANALISAR CRITICAMENTE ASPECTOS RELACIONADOS ÀS ETAPAS DE PROJETO, IMPLANTAÇÃO E OPERAÇÃO EM ETEs COM FILTROS PERCOLADORES NO BRASIL E NA ALEMANHA

O exercício de comparação das características dos processos unitários empregados, das dificuldades de operação e manutenção, das soluções adotadas e das eficiências obtidas entre as estações de tratamento de esgoto com filtros

percoladores visitadas no Brasil e na Alemanha não é adequado a partir do momento em que se tenta estabelecer analogias entre ETEs que operam sob contextos muito distintos.

As diferenças e peculiaridades são verificadas desde a caracterização do esgoto afluente até as exigências quanto à qualidade do efluente tratado, passando por variáveis como extensão territorial dos países, número de habitantes, recursos disponíveis para investimentos, regime de prestação de serviço de esgotamento sanitário à população, tarifas cobradas, processos e equipamentos utilizados, legislações ambientais e de recursos hídricos, fiscalização dos serviços, variações climáticas, hábitos da população local, entre outras tantas variáveis que definem duas realidades muito distintas.

A partir desta breve reflexão, o segundo objetivo específico propôs não uma comparação, mas sim uma análise crítica dos principais aspectos que influenciam o bom funcionamento de um filtro percolador, sendo tais aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção verificados em ETEs visitadas no Brasil e na Alemanha.

A análise crítica ponderou, quando pertinente, os contextos e as características locais, apontando aspectos teóricos e práticos, bem como peculiaridades observadas, de forma que as experiências fossem expostas, discutidas e somadas, visando subsidiar ações para melhoria das ETEs com filtros percoladores.

O fluxograma na Figura 18 ilustra e resume a sequência de atividades definidas e realizadas para cumprir o segundo objetivo específico estabelecido e os subitens na sequência são compostos pelo detalhamento de cada uma das atividades.

Figura 18 – Resumo das atividades para atingir o objetivo específico prático



FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.

### 3.2.1 Levantamento de leis e resoluções aplicáveis no Brasil, no Paraná e na Alemanha

As principais leis e resoluções federais do Brasil e da Alemanha e as resoluções estaduais do Paraná foram apresentadas ainda na Revisão de Literatura, nos itens 2.3.1 e 2.3.2. A contextualização quanto às leis e resoluções aplicáveis no Brasil, no Paraná e na Alemanha foi realizada para compreender a forma como é cobrada a qualidade do efluente tratado e para subsidiar a definição dos parâmetros e limites a serem adotados no presente estudo para os cenários “C” e “CN”.

### 3.2.2 Descrição de aspectos locais do Brasil e da Alemanha

Tanto o levantamento de leis e resoluções quanto a descrição de aspectos nacionais e locais contextualizaram os cenários em que estão inseridas as estações de tratamento de esgoto visitadas no Brasil e na Alemanha e auxiliaram a percepção

e o entendimento quanto às diferenças verificadas e quanto aos possíveis motivos que resultam em tais diferenças.

A contextualização dos aspectos locais do Paraná e do Brasil foi realizada com o levantamento de estatísticas de saneamento estaduais e nacionais mais atualizadas sobre atendimento à população com os serviços de água e esgoto, entre outros índices relacionados ao saneamento, encontradas no Atlas de Esgoto elaborado pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2017), e no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2017).

Os dados sobre atendimento à população foram apresentados no presente estudo para apontar o déficit de esgotamento sanitário e, sobretudo, para evidenciar a relevância e a necessidade de investimentos no setor de saneamento, especificamente para esgotamento sanitário, seja para implantação de novos sistemas, seja para ampliar os sistemas existentes, ou ainda para melhorar a eficiência de estações de tratamento de esgoto existentes.

Os números nacionais e macrorregionais para atendimento de água e esgoto apresentados nesse estudo foram extraídos do “Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2015”, enquanto os dados referentes ao Estado do Paraná, da “Planilha Resumo de Informações Agregadas por Estado”, ambos disponíveis na página digital do SNIS.

As estatísticas de tratamento de esgoto da Alemanha foram extraídas dos documentos “*Abwasser und Klärschlamm in Deutschland statistische Betrachtungen*” (Estatísticas e considerações sobre tratamento de esgoto e lodo de esgoto na Alemanha), e “*Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen*” (Comparação de desempenho de estações municipais de tratamento de esgoto), ambos elaborados pela DWA e publicados em 2014 e 2017, respectivamente.

Considerando a aplicabilidade desse estudo para o Paraná e para o Brasil, as estatísticas de tratamento de esgoto da Alemanha foram apresentadas nesse estudo apenas para conhecimento e contextualização da realidade da Alemanha quanto ao esgotamento sanitário.

### 3.2.3 Levantamento e definição de ETEs a analisar no Brasil e na Alemanha e verificação das práticas de operação e manutenção realizadas

Contextualizados os aspectos locais, foi realizada a etapa de levantamento de campo, por meio das visitas às estações de tratamento de esgoto no Brasil e na Alemanha.

Por questões de aplicabilidade do estudo e de facilidade de acesso aos dados e às estações de tratamento, a escolha das ETEs a serem visitadas e analisadas foi limitada ao Estado do Paraná, Sul do Brasil, e aos Estados de *Baden-Württemberg* e *Bayern*, Sul da Alemanha.

#### 3.2.3.1 Estações de tratamento de esgoto no Paraná

Inicialmente, foi realizado o levantamento do número de municípios com sistema de esgotamento sanitário e tratamento de esgoto no Paraná. Considerando que a Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) atende a maior parte dos municípios do Estado, o levantamento dos processos unitários empregados nas ETEs se restringiu às ETEs operadas por esta Companhia, não considerando, portanto, aqueles sistemas operados por outras empresas privadas ou diretamente operados pela administração municipal.

Ao obter a relação de todas as estações de tratamento de esgoto operadas pela Sanepar, foi possível identificar quantas ETEs dispõem apenas de tratamento preliminar e primário, quantas possuem sistema de pós-tratamento, quantas possuem filtros percoladores como unidade de pós tratamento, e quais são os outros processos unitários empregados.

Esta etapa do estudo ofereceu como resultado, portanto, a quantificação dos processos unitários empregados nas estações de tratamento de esgoto operadas pela Sanepar no Estado do Paraná, permitindo contextualizar a realidade atual do Estado e da Companhia de Saneamento do Paraná, bem como ofereceu como resultado a relação das estações com filtros percoladores a serem analisadas e visitadas.

As visitas foram agendadas com cada regional responsável e realizadas sempre com o acompanhamento do coordenador ou do gestor regional ou de um operador da ETE, com conhecimento de todos os processos unitários da ETE.

### 3.2.3.2 Estações de tratamento de esgoto no Sul da Alemanha

Para definir as ETEs com filtros percoladores a serem visitadas e analisadas no Sul da Alemanha, foi feito um levantamento daquelas que estão localizadas na região de *Stuttgart* ou próximas à região, e que já tivessem estabelecido algum contato com a *Universität Stuttgart* ou com a empresa *Enexio GmbH*, facilitando o agendamento da visita e o deslocamento a cada ETE.

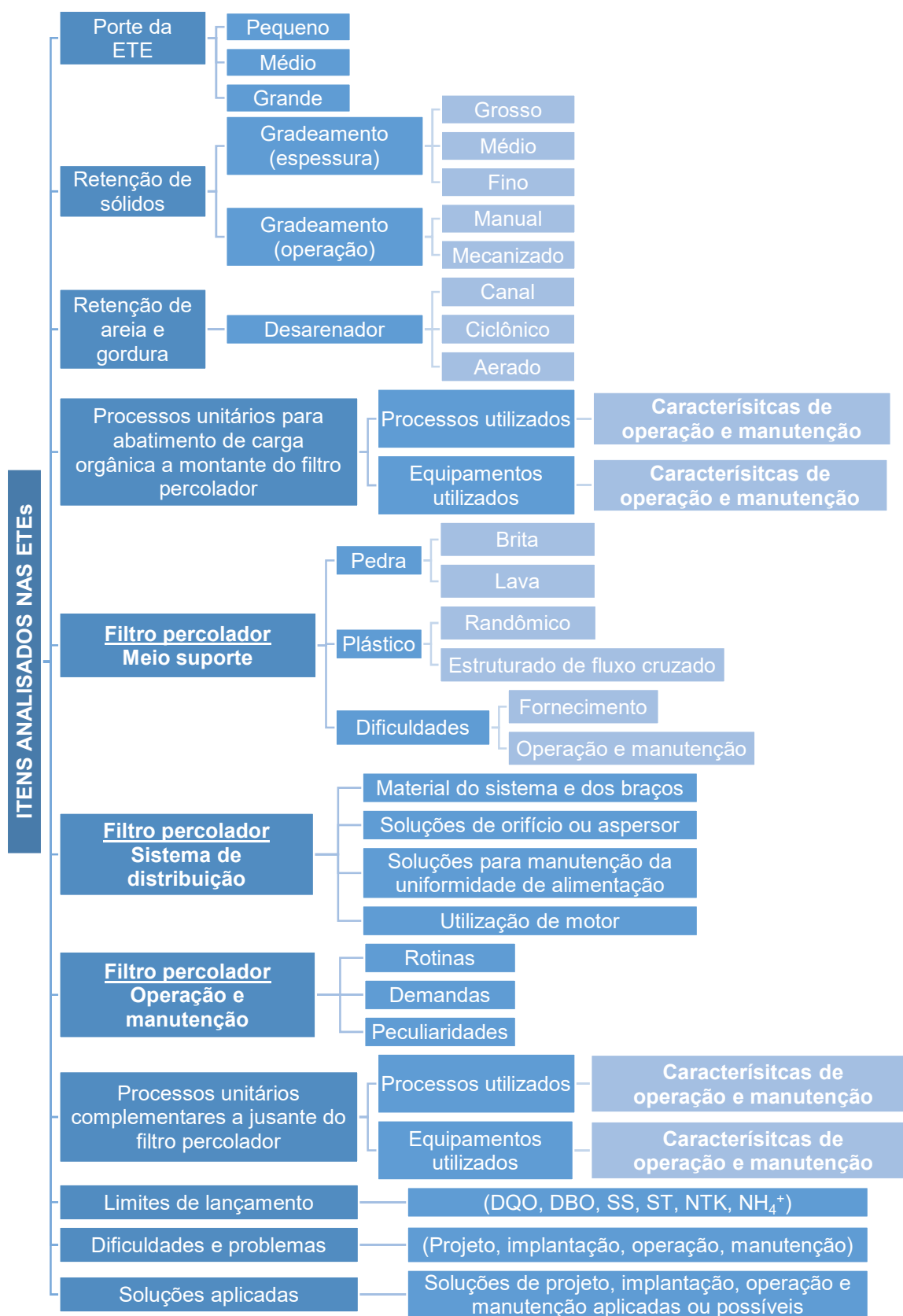
Considerou-se necessário visitar ao menos três estações de tratamento de esgoto, desde que fossem uma de pequeno porte, uma de médio porte e uma de grande porte, visando compreender possíveis variações de processos empregados a montante e a jusante dos filtros percoladores na Alemanha, conforme o porte da ETE, principalmente em função das restrições legais que estabelecem os limites de lançamento em função do porte da ETE. Considerou-se necessário ainda visitar estações que operassem com filtros percoladores com diferentes materiais de meio suporte, em pedra e em plástico, para ampliar o conhecimento em relação às situações e experiências relatadas pela operação das ETEs.

As visitas foram agendadas pela *Universität Stuttgart*, pela co-orientadora desse estudo, e por um engenheiro representante da empresa *Enexio GmbH*. Os contatos foram realizados diretamente com as empresas de saneamento e com os operadores responsáveis em cada ETE. As visitas foram acompanhadas por pelo menos um integrante da equipe de operação de cada ETE, pela co-orientadora desse estudo e pelo engenheiro representante da *Enexio GmbH*.

### 3.2.4 Descrição das ETEs analisadas, das práticas e das experiências de operação

Para subsidiar as visitas e a descrição das ETEs analisadas, foi elaborado um fluxograma, apresentado na Figura 19, que resume os principais itens e aspectos verificados, características da estrutura da ETE, dos processos unitários, das práticas de operação e manutenção, equipamentos, qualidade do efluente final exigida e dificuldades e problemas relatados e soluções empregadas.

Figura 19 – Itens analisados nas visitas às ETEs



FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.



O levantamento de dados e as visitas às estações de tratamento de esgoto no Brasil e na Alemanha possibilitaram a análise de fatores e variáveis pertinentes às etapas de concepção, projeto, obra, operação e manutenção de filtros percoladores.

Para a maioria das ETEs visitadas no Paraná, foi possível ter acesso aos dados de projeto e às concentrações afluentes e efluentes. Nas ETEs visitadas, foram visualizadas as características principais da ETE e as condições de operação e manutenção e outros detalhes pertinentes ao escopo desse estudo, incluindo os equipamentos e as características dos demais processos unitários que compõem as ETEs.

Durante as visitas, os principais questionamentos realizados seguiram o que foi exposto no fluxograma da Figura 19, analisando desde as características do sistema preliminar da ETE até as exigências ambientais, quanto à qualidade do efluente final, verificando as principais características de cada etapa de tratamento.

Procedimentos operacionais para manutenção dos filtros, diferentes comportamentos dos filtros ao longo dos anos, variações relacionadas à sazonalidade, dificuldades e soluções diversas ou fatos peculiares foram oportunamente relatados pelos operadores. Foram observados ainda aspectos relacionados ao histórico de construção e ampliações das ETEs, quando foi o caso.

Todas as visitas realizadas no Paraná foram acompanhadas por pelo menos um integrante da equipe de operação da ETE com conhecimento do processo de tratamento, possibilitando obter relatos detalhados da rotina de operação.

As informações obtidas nas visitas às ETEs do Paraná foram complementadas por informações contidas nos diagnósticos internos periodicamente realizados em todas as ETEs da Sanepar ou por questionamentos diretos e específicos sobre eventuais dúvidas relacionadas aos processos ou às rotinas de operação. Projetos, relatórios técnicos, especificações e dados disponíveis no Sistema de Informações da Sanepar (SISWeb) e no Sistema de Informações Ambientais da Sanepar (SIA) foram acessados para complementar as descrições e análises obtidas em campo.

Todas as visitas realizadas no Sul da Alemanha foram acompanhadas pela co-orientadora do estudo, por um engenheiro representante da empresa *Enexio GmbH* e por um operador responsável pela ETE, com conhecimento do processo de tratamento e da rotina de operação.

As informações obtidas em campo foram complementadas, quando necessário, com materiais gráficos disponíveis nas ETEs e informações disponíveis nos sites das empresas responsáveis pela operação e manutenção das ETEs ou no próprio site do município.

Em todas as visitas foi possível realizar registros fotográficos, visando ilustrar os aspectos e detalhes discutidos no presente estudo.

Considerando que o foco do trabalho não é a descrição de cada ETE de forma isolada, mas sim a análise dos aspectos que influenciam o bom funcionamento de filtros percoladores, relacionando o que está considerado em literatura com o que foi verificado em campo em escala operacional, as informações foram organizadas no capítulo de Resultados e Discussões, no item 4.4, seguindo a mesma sequência lógica dos itens apresentados na Revisão de Literatura, no item 2.5. Foi apresentada uma descrição de cada item ou aspecto analisado, utilizando como exemplos práticos o que foi observado e registrado nas ETEs visitadas, citando e ilustrando cada aspecto abordado com situações visualizadas em campo, em diferentes ETEs.

Essa abordagem facilitou a visualização de semelhanças e diferenças entre características, dificuldades, problemas, soluções e rotinas de operação e manutenção, e subsidiou a análise crítica e a indicação de ações para melhorias para cada aspecto apresentado no estudo.

Para verificar as características das ETEs analisadas e visitadas no Paraná, o item 4.5 faz referência ao Apêndice B, onde está apresentado um quadro resumo que reúne as principais características de cada etapa de tratamento das ETEs com filtros percoladores analisadas no Paraná. A análise desse quadro resumo permite relacionar as características do esgoto afluente e os aspectos de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção com as concentrações do efluente final, estimando eficiência média da ETE e possibilitando a análise dos principais aspectos e práticas que podem resultar em um bom funcionamento dos filtros percoladores.

Também no item 4.5, foi apresentado um descritivo resumido das principais características e informações obtidas referente às ETEs visitadas no Sul da Alemanha, principalmente quanto ao fluxograma geral, já que estas possuíam diferentes fluxogramas e processos unitários, visando a melhor compreensão do funcionamento dessas ETEs e do cenário verificado.

### 3.2.5 Análise crítica das situações verificadas nas ETEs e das características que definem as diferentes realidades em que estão inseridas

A análise crítica das principais características e aspectos que influenciam o bom funcionamento de ETEs com filtros percoladores foi realizada e apresentada ao longo de todo o estudo.

Adicionalmente, no item 4.6 foram apresentadas considerações adicionais sobre características e aspectos que definem as diferentes realidades entre os cenários do Brasil e da Alemanha, incluindo contextos locais que influenciam a caracterização do esgoto afluente, exigências ambientais, diferentes fluxogramas e processos unitários empregados, a qualidade do efluente final, tarifas e capacidade de investimento e a estrutura organizacional das empresas prestadoras de serviço de esgotamento sanitário. O estudo abordou tais aspectos adicionais por considerar que estes também devem ser observados e ponderados visando indicar ações para melhorias que estejam adequadas ao contexto em que está inserida a estação de tratamento de esgoto a ser analisada.

### 3.3 DEFINIÇÕES E SEQUÊNCIA DE ATIVIDADES PARA ORGANIZAR SISTEMATICAMENTE INFORMAÇÕES E RESULTADOS PARA SUBSIDIAR AÇÕES PARA MELHORIAS

Visando subsidiar ações para melhorias em ETEs com filtros percoladores a partir das experiências teóricas e práticas obtidas ao longo do estudo, foi necessário utilizar uma ferramenta de gestão e planejamento que permitisse a sistematização dessas informações.

Os conceitos utilizados para a elaboração de uma Matriz *SWOT - Strengths, Weaknesses, Opportunities and Threats* (forças, fraquezas, oportunidades e ameaças) foram adaptados para esse estudo permitindo indicar “forças”, “fraquezas”, “oportunidades” e “ameaças” para cada aspecto analisado e discutido. Para classificar os itens conforme o modelo previamente estabelecido, a análise foi realizada sob o ponto de vista corporativo, ou seja, tudo o que pode ser controlado a partir de ações internas da Companhia refere-se a “ambiente interno” e é classificado como “força” ou “fraqueza” dos processos, enquanto tudo o que sofre influência do meio externo à Companhia, como prestação de serviço terceirizado ou fornecedores, variações de

mercado, questões sociais e ambientais, alterações nas legislações pertinentes aos processos, entre outros, e que está além do controle da Companhia, refere-se a “ambiente externo” e é classificado como “oportunidade” ou “ameaça”.

Para a alimentação da Matriz *SWOT* adaptada, definiu-se que cada coluna representa um aspecto abordado, enquanto as linhas representam as etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, agrupadas em “projeto”, “implantação” e “operação”. As etapas, por sua vez, foram divididas em subgrupos para descrever “forças”, “fraquezas”, “oportunidades” e “ameaças” identificadas, conforme representado no Quadro 6.

Quadro 6 – Esboço da Matriz *SWOT* adaptada, elaborada para análise dos aspectos discutidos

		<b>Aspecto 1</b>	<b>Aspecto 2</b>	<b>Aspecto 3</b>	<b>Aspecto ... (n)</b>
<b>Etapa de PROJETO</b> (concepção, dimensionamento e projeto)	<b>S</b>	Descrição de pontos fortes para a etapa de <b>projeto</b> referentes ao aspecto 1	(...)	(...)	(...)
	<b>W</b>	(...)	Descrição de pontos fracos para a etapa de <b>projeto</b> referentes ao aspecto 2	(...)	(...)
	<b>O</b>	(...)	(...)	Descrição de oportunidades para a etapa de <b>projeto</b> referentes ao aspecto 3	(...)
	<b>T</b>	(...)	(...)	(...)	Descrição de ameaças para a etapa de <b>projeto</b> referentes ao aspecto “n”
<b>Etapa de IMPLANTAÇÃO</b> (obra, aquisição e instalação de equipamentos)	<b>S</b>	Descrição de pontos fortes para a etapa de <b>implantação</b> referentes ao aspecto 1	(...)	(...)	(...)
	<b>W</b>	(...)	Descrição de pontos fracos para a etapa de <b>implantação</b> referentes ao aspecto 2	(...)	(...)
	<b>O</b>	(...)	(...)	Descrição de oportunidades para a etapa de <b>implantação</b> referentes ao aspecto 3	(...)
	<b>T</b>	(...)	(...)	(...)	Descrição de ameaças para a etapa de <b>implantação</b> referentes ao aspecto “n”
<b>Etapa de OPERAÇÃO</b> (operação e manutenção)	<b>S</b>	Descrição de pontos fortes para a etapa de <b>operação</b> referentes ao aspecto 1	(...)	(...)	(...)
	<b>W</b>	(...)	Descrição de pontos fracos para a etapa de <b>operação</b> referentes ao aspecto 2	(...)	(...)
	<b>O</b>	(...)	(...)	Descrição de oportunidades para a etapa de <b>operação</b> referentes ao aspecto 3	(...)
	<b>T</b>	(...)	(...)	(...)	Descrição de ameaças para a etapa de <b>operação</b> referentes ao aspecto “n”

FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** A Matriz foi alimentada a partir das análises e discussões elaboradas neste estudo e os resultados estão disponíveis no capítulo de resultados e discussões e nos apêndices.

A partir da Matriz alimentada, foi possível distinguir quais são os “pontos fortes”, “pontos fracos”, “oportunidades” e “ameaças” em cada item analisado, correlacionando-as de tal forma a identificar combinações favoráveis ou não aos processos. As cinco correlações possíveis em uma análise cruzada de Matriz *SWOT* estão descritas no Quadro 7.

Quadro 7 – Correlações estabelecidas a partir da análise cruzada da Matriz *SWOT*

	S (pontos fortes)	W (pontos fracos)	O (oportunidades)	T (ameaças)
S (pontos fortes)	-	<b>(S+W)</b>	<b>(S+O)</b>	<b>(S+T)</b>
W (pontos fracos)	<b>(S+W)</b> Pontos fortes podem ser direcionados para minimizar ou suprir demandas dos pontos fracos	-	<b>(W+O)</b>	<b>(W+T)</b>
O (oportunidades)	<b>(S+O)</b> Pontos fortes podem ser dedicados às oportunidades, visando o melhor aproveitamento da condição interna e externa	<b>(W+O)</b> Pontos fracos devem ser minimizados visando não perder oportunidades	-	-
T (ameaças)	<b>(S+T)</b> Pontos fortes podem proteger ou prevenir as ameaças	<b>(W+T)</b> Cenário mais descoberto e delicado, em que as ações devem ser “defensivas”	-	-

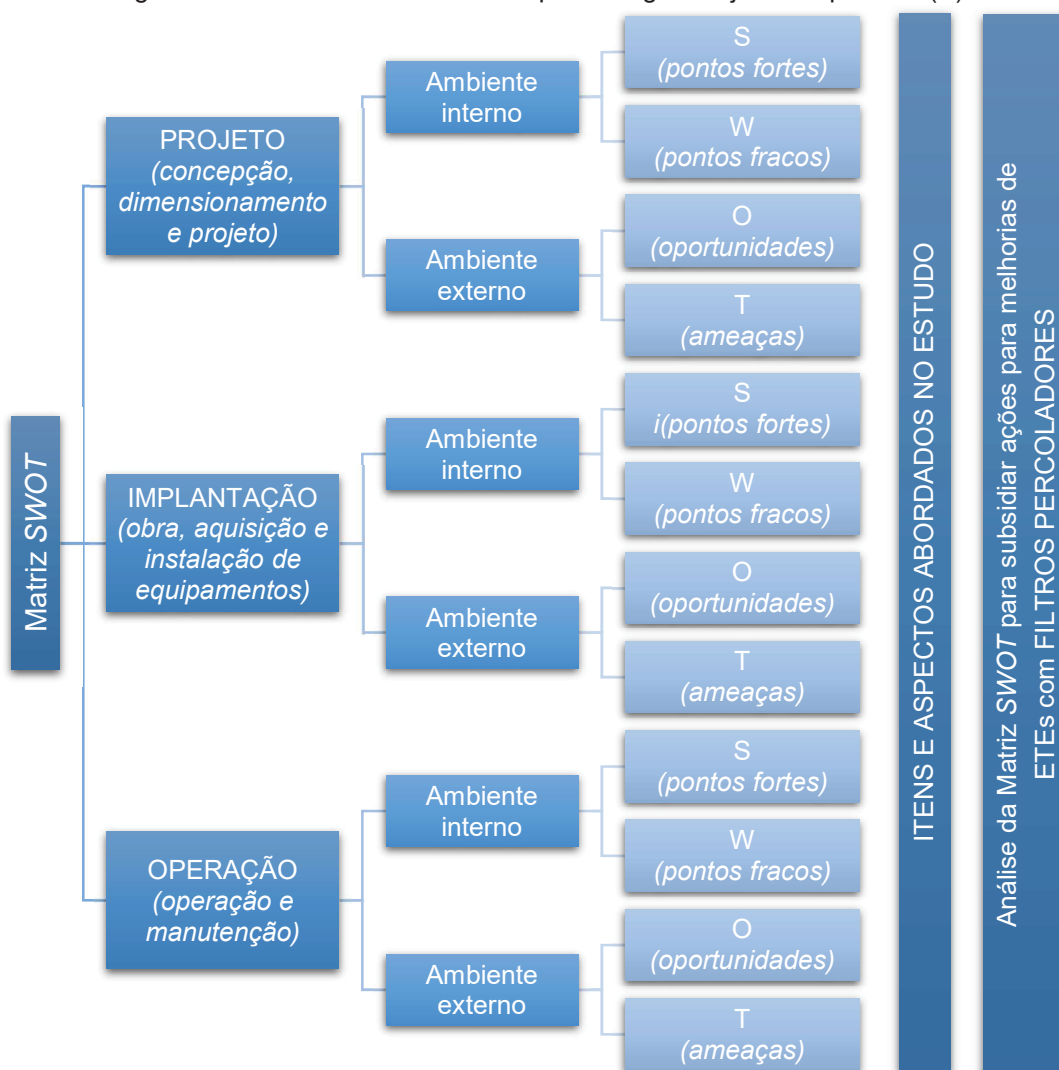
FONTE: O Autor (2017).

A partir dos “pontos fortes”, “pontos fracos”, “oportunidades” e “ameaças” apontados, e feitas as cinco correlações através da análise cruzada da Matriz *SWOT*, foi possível sistematizar as informações e os resultados obtidos para que estes sirvam de subsídio para ações para melhorias nas ETEs com filtros percoladores, conforme o que foi discutido ao longo de todo o estudo, relacionando as verificações teóricas de literatura e de outros estudos e as observações práticas obtidas em escala

operacional para cada aspecto discutido, para as etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de ETEs com filtros percoladores.

O fluxograma na Figura 20 ilustra e resume a sequência de atividades definidas e realizadas para aplicação da ferramenta *SWOT* e para subsidiar a elaboração das recomendações de ações para melhorias.

Figura 20 – Resumo das atividades para atingir o objetivo específico (iii)



FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** O sentido de leitura do fluxograma é da esquerda para a direita.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES DE DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES

A partir das definições adotadas e estabelecidas no item 3.1, foram realizados os cálculos de simulação de dimensionamento de filtros percoladores para o cenário “C”, caracterizado pela degradação de carbono, ou matéria orgânica, representado pelos filtros FP-C1 a FP-C6, e para o cenário “CN”, que objetiva a remoção de carbono e a conversão de nitrogênio e redução de nitrogênio amoniacal no mesmo filtro, representado pelos filtros FP-CN1 a FP-CN6. O que definiu a nomenclatura dos filtros em FP-C1 a FP-C6 e FP-CN1 a FP-CN6 foram a variação das equações de dimensionamento aplicadas, citadas por Metcalf & Eddy (2016), Jordão e Pessoa (2014) e propostas pela DWA (2016), bem como a variação do meio suporte, em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado.

As simulações de cálculo realizadas foram chamadas de “seções”. A primeira seção de cálculos considerou taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas médias para a brita e para o plástico, atribuídas a partir das faixas de valores sugeridas pela literatura, apresentadas na Tabela 6, item 2.5.2.7.

Para os filtros FP-C1 a FP-C6, dimensionados como filtros de alta taxa, foram atribuídos os valores médios para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica a partir das faixas de valores sugeridas para filtros com pedra brita e plástico, operando em alta taxa. O mesmo critério foi aplicado para os filtros FP-CN1, FP-CN3 e FP-CN5, com pedra brita, dimensionados para promover a nitrificação, operando, portanto, em baixa taxa.

Já para os filtros FP-CN2, FP-CN4 e FP-CN6, com plástico, dimensionados para promover a nitrificação, não foi possível estabelecer um valor médio da mesma forma, pois a literatura não especifica uma faixa de valores para plástico em filtros operando em baixa taxa.

Os materiais plásticos com maior área superficial específica foram idealizados justamente para possibilitar a operação de filtros percoladores com taxas hidráulicas e cargas orgânicas volumétricas mais elevadas. A aplicação de baixas taxas e cargas em materiais plásticos com alta área superficial específica disponível resulta em baixa eficiência de molhamento do meio suporte e baixo desenvolvimento do biofilme.



Considerando ainda as variações dos materiais plásticos, recomenda-se que os parâmetros de projeto sejam indicados pelos fornecedores, conforme as características do material e conforme os testes realizados pelos fabricantes.

Para desenvolver as simulações de dimensionamento para este estudo, os valores adotados para os filtros FP-CN2, FP-CN4 e FP-CN6 foram os mesmos utilizados para os filtros em alta taxa FP-C2, FP-C4 e FP-C6, conforme apresentado nos itens 3.1.6 e 3.1.7.

Os subitens a seguir apresentam os resultados das simulações de dimensionamento e as discussões acerca das variáveis e dos valores obtidos nas diferentes seções realizadas, relacionando a influência das variáveis nos resultados de dimensionamento e de eficiência esperada, possibilitando compreender a dinâmica e o funcionamento dos filtros percoladores através das representações matemáticas obtidas ao utilizar as diferentes equações propostas.

#### 4.1.1 Resultados de dimensionamento de filtros percoladores para degradação da matéria orgânica e considerações

##### 4.1.1.1 Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf & Eddy para o cenário “C”

A partir das equações de Schulze e de Velz modificada, foram realizadas simulações para os filtros FP-C1 e FP-C2, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas para atender à principal condicionante do cenário “C” para degradação de carbono, com concentração de DBO inferior a 40 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de DBO efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 8, para cada equação utilizada e para as diferentes seções de simulações calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 8 – Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf &amp; Eddy para o cenário “C”

Identificação do filtro percolador	1ª seção (TAH <sub>média</sub> ) (h=3) (r=0)			2ª seção (TAH variável) (h=3) (r=0)			3ª seção (TAH variável) (h=3) (r=0,5)			4ª seção (TAH variável) (h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,5)		
Meio suporte	FP-C1	FP-C2	FP-C1	FP-C2	FP-C1	FP-C2	FP-C1	FP-C2	FP-C1	FP-C2	FP-C1	FP-C2
Identificação das células	Pedra brita (A)	Plástico estruturado (B)	Pedra brita (C)	Plástico estruturado (D)	Pedra brita (E)	Plástico estruturado (F)	Pedra brita (G)	Plástico estruturado (H)	Pedra brita (G)	Plástico estruturado (H)	Pedra brita (G)	Plástico estruturado (H)
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(1) 50	150	50	-	-	-	-	-	-	-	-	150
Altura útil do meio suporte (m)	(2) 3,0	3,0	3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	6,0
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(3) 27,0	42,5	3,5	-	-	-	-	-	-	-	-	14,0
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(4) 1,08	1,70	0,14	-	-	-	-	-	-	-	-	0,39
Razão de recirculação (r = Q <sub>Recirculada</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(5) 0,0	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,5
Constante hidráulica do meio suporte (n)	(6) 0,50	0,50	0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	0,50
DBO <sub>efluente</sub> (mg/l) (Schulze e Germain)	(7) 80,6	87,4	39,7	-	-	-	-	-	-	-	-	39,7
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> ) (Schulze, 1960)	(8) 2.222	1.412	17.143	-	-	-	-	-	-	-	-	8.571
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(9) 50	150	50	150	50	150	50	150	50	150	50	150
Altura útil do meio suporte (m)	(10) 3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	6,0
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(11) 27,0	42,5	3,3	30,0	5,5	50,0	5,5	50,0	5,5	50,0	5,5	75,0
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(12) 1,08	1,70	0,14	1,20	0,22	2,80	0,22	2,80	0,22	2,80	0,22	2,10
Razão de recirculação (r = Q <sub>Recirculada</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(13) 0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
DBO <sub>efluente</sub> (mg/l) (Veiz modificada)	(14) 81,3	47,3	39,4	39,6	39,3	39,5	39,3	39,5	39,3	39,5	39,3	21,4
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> ) (Q <sub>total</sub> /TAH·h <sub>util</sub> )	(15) 2.222	1.412	18.182	2.000	10.909	1.200	10.909	1.200	10.909	1.200	10.909	1.600

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.2 e 2.5.2.5, na revisão de literatura. <sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”. <sup>(4)</sup> Estimada considerando incremento de 40 % de carga de DBO por dia referente à vazão recirculada, ou seja, considerando que a eficiência de abatimento de carga orgânica do filtro percolador mediana é de cerca de 60 % - estimado a partir da mediana de 7 ETES visitadas no Paraná.

Na primeira seção, os resultados obtidos para concentração final do efluente em termos de DBO para o filtro FP-C1, em pedra brita, para as equações de Schulze e Germain e de Velz modificada foram semelhantes (comparar células A7 e A14), enquanto os resultados obtidos para o filtro FP-C2, em plástico estruturado, foram divergentes (comparar células B7 e B14). Ao comparar os dois filtros FP-C1 e FP-C2, observa-se que aplicando a Equação de Schulze e Germain, foram obtidas concentrações semelhantes para brita e para plástico (comparar células A7 e B7), enquanto ao aplicar a Equação de Velz modificada, foram obtidos resultados de eficiência distintos para o filtro em brita e em plástico (comparar células A14 e B14). Tais comparações indicam que a equação de Schulze não considera características do meio suporte como ganho de área superficial específica, que tendem a resultar em incremento de eficiência, principalmente para filtros percoladores que operam em regime de alta taxa.

Para a utilização da Equação de Velz modificada, foi possível verificar aumento da eficiência e redução de volume ao substituir a brita pelo plástico estruturado (comparar células A14 e B14 e células A15 e B15), resultados esperados ao utilizar meio suporte com maior área superficial específica e ao aplicar maior taxa hidráulica. Já para a Equação de Schulze e Germain, não foi possível evidenciar o mesmo comportamento (comparar células A7 e B7 e células A8 e B8). Aplicando a Equação de Schulze e Germain, a alteração do meio suporte implicou na redução do volume, o que fez com que a eficiência fosse prejudicada, resultando em uma concentração final superior, não representando a dinâmica de funcionamento esperada.

A Equação de Schulze e Germain está principalmente em função da altura do meio suporte e não representou da forma esperada a dinâmica de funcionamento e as relações entre as variáveis quando se substitui o meio suporte por um material com maior área superficial específica. Considerando essa verificação, os cálculos das seções 2 e 3 foram realizados apenas para o filtro FP-C1, com pedra brita.

Na segunda seção, para o dimensionamento do filtro FP-C1 a partir da Equação de Schulze e Germain foi variada a taxa de aplicação hidráulica para obter concentração de DBO inferior a 40 mg/l. Foi necessário reduzir a taxa a um valor fora da faixa recomendada para taxa de aplicação hidráulica em filtros de alta taxa com pedra brita (célula C3), resultando em um grande volume de meio suporte necessário (célula C8) e, conseqüentemente em uma carga orgânica volumétrica também muito

inferior à recomendada pela literatura (célula C4). Para o dimensionamento do filtro FP-C1 a partir da Equação de Velz modificada, foi observada a mesma dinâmica, com uma taxa de aplicação hidráulica inferior à recomendada (célula C11), um grande volume de meio suporte (célula C15) e uma carga orgânica volumétrica inferior à recomendada pela literatura (célula C12). Já para o filtro FP-C2, a maior área superficial específica permitiu aumentar a taxa de aplicação hidráulica (célula D11), obtendo uma carga orgânica volumétrica compatível com filtros percoladores de alta taxa com meio suporte plástico e um volume significativamente inferior se comparado ao obtido para o FP-C1 em brita (comparar células C15 e D15).

A taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica devem ser observados e comparados aos valores citados em literatura. Taxas e cargas inferiores aos valores recomendados representam pouca disponibilidade de alimento para o desenvolvimento do biofilme, podendo resultar em uma eficiência aquém do esperado e no não atingimento do objetivo proposto para o filtro.

Na terceira seção, foi verificado o efeito da recirculação para os filtros FP-C1 e FP-C2, dimensionados também apenas a partir da Equação de Velz modificada, já que essa variável não é função direta da Equação proposta por Schulze e Germain. Ao atribuir uma razão de recirculação de 50 % (célula E13), para o filtro FP-C1 com brita, foi necessário atribuir uma taxa de aplicação hidráulica próxima ao limite mínimo recomendado (célula E11) para obter a eficiência desejada. Nesse caso, o filtro estaria operando próximo a um regime de baixa taxa. Já para o filtro FP-C2, a maior disponibilidade de área superficial específica do meio suporte plástico (célula F9) permitiu atribuir uma taxa de aplicação hidráulica 9 vezes maior se comparada à aplicada no FP-C1 (comparar células E11 e F11), resultando em um dimensionamento de um filtro com volume 9 vezes inferior ao FP-C1 (comparar células E15 e F15).

Na quarta e última seção foi calculado o efeito do incremento de altura para o FP-C2, já que o meio suporte plástico permite projetar filtros com maiores profundidades. Nessa seção, foram utilizadas todas as equações propostas para esse conjunto de simulações, já que ambas consideram a altura do filtro como uma variável que influencia a eficiência do tratamento. Ao utilizar a Equação de Schulze e Germain, para obter a eficiência esperada inferior a 40 mg/l em termos de DBO, foi necessário aplicar uma taxa de aplicação hidráulica baixa tal que se enquadrou tanto na faixa recomendada para filtros com pedra quanto com plástico (célula H3). Já ao aplicar a Equação de Velz modificada, a taxa máxima recomendada (célula H11) resultou em

uma eficiência além da desejada, indicando que, matematicamente, seria possível atribuir uma taxa ainda maior, resultando em um volume menor, atingindo ainda o objetivo de concentração de DBO inferior a 40 mg/l. Considerando o limite máximo de taxa de aplicação hidráulica sugerido em literatura, foi obtido um volume total de meio suporte cerca de 5 vezes inferior ao volume obtido a partir da Equação de Schulze e Germain (comparar células H8 e H15), refletindo em cargas orgânicas volumétricas também muito distintas (comparar células H4 e H12), sendo a carga orgânica volumétrica obtida a partir da Equação de Schulze e Germain inferior à recomendada pela literatura.

#### 4.1.1.2 Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário “C”

A partir das equações do NRC, de Velz original e de Eckenfelder, foram realizadas simulações para os filtros FP-C3 e FP-C4, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas para atender à principal condicionante do cenário “C”, para degradação de carbono, com concentração de DBO inferior a 40 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de DBO efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 9, para cada equação utilizada e para as diferentes seções calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 9 – Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário “C”

Identificação do filtro percolador		1ª seção (COV <sub>média</sub> e TAH <sub>média</sub> ) (h=3, r=0)				2ª seção (COV, h, TAH variáveis) (h=3, r=0)				3ª seção (COV, h, TAH variáveis) (h=3, r=0,5)				4ª seção (COV, h, TAH variáveis) (h <sub>brita</sub> =3, h <sub>plástico</sub> =6, r=0,5)			
		FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4	FP-C3	FP-C4
Meio suporte		Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado
Identificação das células		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)								
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(16)	50	150	50	-	50	-	50	-	50	-	50	-	50	-	50	-
Altura útil do meio suporte (m)	(17)	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(18)	27,0	42,5	32,5 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-	27,0 <sup>(4)</sup>	-
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(19)	1,08	1,70	1,30	-	1,30	-	1,30	-	1,80	-	1,80	-	1,80	-	1,80	-
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(20)	0,0	0,0	0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-
DBO <sub>efluente</sub> (NRC)	(21)	37,1	43,1	39,5	-	39,5	-	39,5	-	39,7	-	39,7	-	39,7	-	39,7	-
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> ) <sup>(5)</sup>	(22)	2.222	1.412	1.846	-	1.846	-	1.846	-	1.333	-	1.333	-	1.333	-	1.333	-
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(23)	50	150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Altura útil do meio suporte (m)	(24)	3,0	3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(25)	27,0	42,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(26)	1,08	1,70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(27)	0,0	0,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
DBO <sub>efluente</sub> (Velz original)	(28)	42,6	42,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> ) <sup>(5)</sup>	(29)	2.222	1.412	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(30)	50	150	50	-	50	-	50	-	50	-	50	-	50	-	150	-
Altura útil do meio suporte (m)	(31)	3,0	3,0	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	3,0	-	6,0	-
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(32)	27,0	42,5	14,0	-	14,0	-	14,0	-	14,0	-	14,0	-	14,0	-	57,0	-
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(33)	1,08	1,70	0,56	-	0,56	-	0,79 <sup>(4)</sup>	-	0,79 <sup>(4)</sup>	-	0,79 <sup>(4)</sup>	-	0,79 <sup>(4)</sup>	-	1,60 <sup>(4)</sup>	-
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(34)	0,0	0,0	0,0	-	0,0	-	0,0	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-	0,5	-
DBO <sub>efluente</sub> (Eckenfelder)	(35)	30,1	24,7	39,6	-	39,6	-	39,6	-	39,6	-	39,6	-	39,6	-	39,4	-
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> ) <sup>(6)</sup>	(36)	2.222	1.412	4.285	-	4.285	-	4.278	-	4.278	-	4.278	-	4.278	-	2.105	-

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.3 e 2.5.2.5, na revisão de literatura.<sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”.<sup>(4)</sup> Taxa de aplicação hidráulica em função do volume e da área superficial total do meio suporte. <sup>(5)</sup> Volume calculado em função da carga afluente. <sup>(6)</sup> Volume calculado em função da taxa de aplicação hidráulica.

Na primeira seção, aplicando as equações de NRC, Velz original e Eckenfelder, para as mesmas taxas médias de aplicação hidráulica obtidas ou atribuídas (células A18, B18, A25, B25, A32 e B32) e cargas orgânicas volumétricas (células A19, B19, A26, B26, A33 e B33), houve variação de eficiência da ordem de 30 % para o filtro FP-C3 em pedra brita (comparar células A21, A28 e A35) e da ordem de 40 % para o filtro FP-C4 em plástico estruturado (comparar células B21, B28 e B35), sendo os valores obtidos a partir da Equação de Eckenfelder sempre inferiores se comparados aos obtidos pelas equações de NRC e Velz original.

Para a Equação do NRC, cuja principal variável é a carga orgânica volumétrica, ao comparar os resultados obtidos para os filtros FP-C3 e FP-C4, atribuir uma maior carga orgânica volumétrica (comparar células A19 e B19) implica em um menor volume de meio suporte (comparar células A22 e B22), resultando em uma eficiência menor (comparar células A21 e B21). Tal dinâmica de funcionamento representada pela Equação de NRC é divergente daquela que seria esperada ao substituir a pedra brita pelo meio suporte plástico estruturado, possibilitando atribuir maior carga orgânica volumétrica em função da maior área superficial específica e da maior capacidade de assimilação de cargas oferecida pelo material plástico. Considerando que a representação obtida por meio da Equação de NRC não é compatível ao que seria esperado para o comportamento de um filtro percolador, para as demais seções não foram apresentados cálculos referentes à variação de material utilizando a Equação de NRC. Considerando também que a variação de altura do meio suporte não é considerada nessa equação, a última seção referente à essa variação também não foi calculada.

Para a Equação de Velz original, em que a eficiência está em função apenas da altura útil do filtro, a concentração em termos de DBO do efluente foi a mesma (comparar células A28 e B28), independente do volume total (comparar células A29 e B29). Tais resultados evidenciam que o comportamento real de um filtro percolador pode não ser representado adequadamente pela Equação de Velz original. A partir dessa verificação, não foram calculadas outras seções para a Equação de Velz original nas simulações realizadas no presente estudo.

Já a Equação de Eckenfelder relaciona mais variáveis, representando matematicamente de forma mais real a dinâmica de um filtro, principalmente sob o aspecto hidráulico, já que está em função da taxa de aplicação hidráulica. Ao alterar o meio suporte de pedra brita para plástico estruturado, aplicando taxas hidráulicas



médias adequadas aos dois materiais (comparar células A32 e B32), foi verificada a redução do volume total necessário para o filtro FP-C4 se comparado ao FP-C3 (comparar células A36 e B36), e o consequente aumento da carga orgânica volumétrica (comparar células A33 e B33), resultando em um aumento da eficiência do tratamento em termos de DBO (comparar células A35 e B35). Essa dinâmica retrata um comportamento esperado quando se substitui um material empregado como meio suporte por outro material de maior área superficial específica, aumentando a capacidade de assimilação hidráulica e aplicando taxas hidráulicas compatíveis com a área superficial específica do material utilizado como meio suporte, obtendo a redução do volume e a manutenção da eficiência ou a manutenção do volume e o ganho de eficiência.

A Equação de Eckenfelder não está, no entanto, em função da área superficial específica e a carga orgânica volumétrica aplicada, sendo esta última obtida a partir da razão entre a carga afluenta e o volume total do meio suporte. Para as seções seguintes, foram apresentados resultados a partir da variação da taxa de aplicação hidráulica, da recirculação e da altura do meio suporte, não sendo possível apresentar, no entanto, comparações entre o filtro FP-C3 e FP-C4, com pedra brita e plástico estruturado, respectivamente, já que a Equação de Eckenfelder não relaciona diretamente a área superficial específica do meio suporte.

Na segunda seção, para a Equação de NRC e para a Equação de Eckenfelder, foram ajustadas, respectivamente, a carga orgânica volumétrica (célula C19) e a taxa de aplicação hidráulica (célula C32), com o objetivo de aproximar a concentração final a 40 mg/l em termos de DBO (células C21 e C35). Na simulação a partir da Equação de Eckenfelder, ao reduzir a taxa de aplicação hidráulica (comparar células C18 e C32), para manter a mesma concentração de DBO efluente, o volume aumentou (comparar células C22 e C36). O volume resultante da Equação de Eckenfelder foi mais de duas vezes superior ao obtido a partir da Equação de NRC (comparar células C22 e C36), enquanto a carga orgânica atribuída para a simulação de dimensionamento na Equação de NRC foi mais de duas vezes superior à carga orgânica volumétrica obtida no dimensionamento a partir da Equação de Eckenfelder. Tal verificação é justificada pelo fato de que a Equação de NRC foi concebida em função da carga orgânica volumétrica, enquanto a Equação de Eckenfelder, em função da taxa de aplicação hidráulica e da altura do meio suporte.

Na terceira seção, foi atribuída razão de recirculação. Tanto para NRC quanto para Eckenfelder, ao comparar os resultados obtidos na terceira e na segunda seção para o filtro FP-C3, foi verificado o aumento da carga orgânica volumétrica (comparar células C19 e E19 e células C33 e E33), a redução do volume total de meio suporte necessário (comparar células C22 e E22 e células C36 e E36) e a manutenção da eficiência (comparar células C21 e E21 e células C35 e E35). Os resultados obtidos ao simular a prática da recirculação estão coerentes ao comportamento esperado e ao que é indicado na teoria. Ao aplicar uma razão de recirculação, pode-se aumentar o volume e obter maior eficiência ou pode-se manter a eficiência e obter redução do volume total de meio suporte necessário para o filtro.

Por fim, na quarta seção foi apresentada simulação de dimensionamento apenas a partir da Equação de Eckenfelder. Ao variar a altura do filtro FP-C4 (célula H31), atribuindo uma razão de recirculação de 50 % (célula H34), o objetivo de concentração do efluente com 40 mg/l em termos de DBO foi atingido com taxa de aplicação hidráulica (célula H32) e carga orgânica volumétrica (célula H33) de acordo com faixas estabelecidas pela literatura para filtros percoladores com meio suporte plástico operando em alta taxa.

#### 4.1.1.3 Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário “C”

A partir da equação de Velz modificada ajustada pelo método DWA, foram realizadas simulações para os filtros FP-C5 e FP-C6, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas para atender à principal condicionante do cenário “C” para degradação de carbono, com concentração de DBO inferior a 40 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de DBO efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 10, para cada equação utilizada e para as diferentes seções de simulações calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 10 – Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário “C”

		1ª seção (TAH <sub>médica</sub> ) (h=3) (r=0)		2ª seção (TAH <sub>máx</sub> ou COV <sub>máx</sub> ) (h=3) (r=0)		3ª seção (TAH <sub>máx</sub> ou COV <sub>máx</sub> ) (h=3) (r=0,5)		4ª seção (TAH <sub>máx</sub> ou COV <sub>máx</sub> ) (h <sub>brita</sub> =3, h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,5)	
		FP-C5	FP-C6	FP-C5	FP-C6	FP-C5	FP-C6	FP-C5	FP-C6
Identificação do filtro percolador		Pedra brita	Plástico estruturado			Pedra brita	Plástico estruturado		
Meio suporte		(A)	(B)	(C)	(D)	(E)	(F)	(G)	(H)
Identificação das células									
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(37)	50	150	50	150	50	150	-	150
Altura útil do meio suporte (m)	(38)	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	-	6,0
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(39)	27,0	42,5	45,1	75	48,0	75	-	75
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(40)	1,08	1,70	1,80	3,00	1,80	2,80 <sup>(4)</sup>	-	1,40 <sup>(4)</sup>
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(41)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,5	-	0,5
DQO <sub>efluente</sub> (mg/l) (DWA)	(42)	118,2	57,8	132,7	78,4	103,8	47,6	-	28,5
DBO <sub>efluente</sub> (mg/l) (DWA) (estimativa DQO/DBO=4)	(43)	29,5	14,5	33,2	19,6	26,0	11,9	-	7,1
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> )	(44)	2.221	1.414	1.330	800	1.867	1.200	-	2.400

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.4 e 2.5.2.5, na revisão de literatura. <sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção já realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”.

O método DWA (2016) adaptou a Equação de Velz modificada em termos de DQO. Assim, a concentração de DBO foi obtida pela razão DQO/DBO igual a 4,0, sendo esse valor estimado a partir das medianas obtidas nas análises das ETes da Sanepar.

Na primeira seção, as taxas de aplicação hidráulica médias adotadas (células A39 e B39) já resultaram em concentrações de DBO inferiores a 40 mg/l para os dois filtros FP-C5 e FP-C6. O filtro FP-C6, em plástico estruturado, apresentou concentração de DBO efluente 51 % inferior ao filtro FP-C5, em pedra brita (comparar células A43 e B43). O volume obtido no FP-C5 foi 1,6 vezes superior se comparado ao volume do FP-C6 (comparar células A44 e B44), implicando em um aumento da carga orgânica volumétrica no filtro FP-C6 (comparar células A40 e B40), em função do menor volume. As variações estão relacionadas à possibilidade de incremento da taxa de aplicação hidráulica quando se possui maior área superficial específica disponível no meio suporte, aumentando a atividade biológica por volume do filtro, sendo essa dinâmica de desenvolvimento biológico esperado principalmente para filtros percoladores de alta taxa hidráulica.

As concentrações em termos de DBO obtidas foram significativamente inferiores ao limite de 40 mg/l proposto. Considerando tais resultados, nas demais seções, os cálculos foram realizados para as taxas hidráulicas e cargas orgânicas volumétricas com valores próximos aos máximos citados em literatura. Mesmo atribuindo taxas e cargas máximas para a pedra brita e para o plástico, todas as simulações resultaram em concentrações inferiores a 40 mg/l em termos de DBO.

Na segunda seção, aplicando as taxas hidráulicas máximas (células C39 e D39), foram atingidas também as cargas limites máximas recomendadas para a brita e para o plástico (células C40 e D40). O filtro FP-C6, em plástico estruturado, apresentou volume total 1,6 vezes inferior ao obtido para o FP-C5, em pedra brita (comparar células C44 e D44). A concentração de DBO efluente também apresentou redução proporcional à redução de volume, sendo a DBO obtida no filtro FP-C6 41 % inferior à obtida na simulação para o filtro FP-C5 (comparar células C43 e D43).

Na terceira seção, foi adicionada a prática de recirculação (células E41 e F41). Aplicando a taxa hidráulica máxima para o filtro FP-C5 em brita, obteve-se carga orgânica volumétrica superior à máxima recomendada. Assim, a taxa foi reduzida (célula E39), refletindo no aumento do volume, atingindo a carga máxima recomendada (célula E40). Já para o filtro FP-C6 em plástico, a taxa hidráulica

máxima (F39) resultou em uma carga orgânica próxima à máxima (célula F40), coincidindo com a faixa sugerida em literatura. O filtro FP-C6 apresentou volume total 1,6 vezes inferior ao obtido para o FP-C5 (comparar células E44 e F44). A concentração de DBO efluente também apresentou redução proporcional à redução de volume, sendo a DBO obtida no filtro FP-C6 54 % inferior à obtida na simulação para o filtro FP-C5 (comparar células E43 e F43).

Considerando que foram mantidas as taxas e cargas aplicadas na segunda e na terceira seção, é oportuno comparar as concentrações efluentes e os volumes resultantes sem recirculação e com recirculação para os filtros FP-C5 e FP-C6. Para o filtro com pedra brita, FP-C5, atribuir 50 % de recirculação implicou em uma redução de aproximadamente 22 % da concentração de DBO (comparar células C43 e E43) e em um aumento de 40 % do volume total necessário (comparar células C44 e E44). Já para o filtro com plástico estruturado, FP-C6, a prática da recirculação resultou em uma concentração 40 % inferior à obtida no FP-C6 sem recirculação (comparar células D43 e F43), implicando, porém, em um aumento de 50 % do volume do filtro (comparar células D44 e F44).

Cabe ressaltar que variações atribuídas a estas simulações devem considerar as alterações de volume, que implicam diretamente na carga orgânica volumétrica aplicada, que, quando superior à recomendada, não mais garante a eficiência calculada, ou que, quando muito inferior à recomendada, representa pouco alimento para a biomassa e baixo desenvolvimento do biofilme, resultando também em uma eficiência inferior à esperada.

A quarta seção apresentou uma simulação para o filtro FP-C6, considerando que o material plástico estruturado permite aumentar a altura útil do meio suporte. Mantendo a taxa de aplicação hidráulica máxima recomendada para plástico (célula H39), ao aumentar a altura do meio suporte (célula H38), o volume dobrou em relação à seção anterior (comparar células F44 e H44), reduzindo pela metade a carga orgânica volumétrica (comparar células F40 e H40). Tal redução de carga é resultado direto do aumento da altura e do volume, não representando redução de carga orgânica, não refletindo em redução de alimento para a biomassa nas primeiras camadas do meio suporte, na parte mais superior do filtro. A maior eficiência é consequência do aumento do tempo de detenção hidráulica e do tempo de contato entre o efluente em tratamento e a biomassa aderida ao meio suporte. A altura adicional atribuída a essa seção promove uma redução ainda maior da concentração

de DBO, degradando a matéria orgânica mais dificilmente biodegradável, podendo atingir níveis parciais ou totais de nitrificação.

#### 4.1.1.4 Comparações entre as equações referentes à remoção de matéria orgânica e discussões

Quanto às equações e variáveis utilizadas para os cálculos de degradação de carbono, as equações desenvolvidas pelo NRC (1946) relacionam a carga orgânica aplicada ao volume do meio suporte e ao fator de recirculação, obtendo uma eficiência de tratamento em termos de DBO. As variáveis que influenciam os resultados de dimensionamento são, portanto, a carga orgânica volumétrica e a razão de recirculação. Enquanto a razão de recirculação é diretamente proporcional à eficiência do filtro, a carga orgânica volumétrica é inversamente proporcional à eficiência do filtro, ou seja, quanto maior a razão de recirculação, maior a eficiência do tratamento, e quanto maior a carga orgânica volumétrica aplicada, menor será a eficiência do tratamento, para um mesmo volume de filtro.

A Equação de Velz original (1948) sugere apenas uma relação entre DBO efluente e afluente a partir da profundidade do meio suporte e da constante de reação. Os resultados obtidos a partir da Equação de Velz original variam, portanto, apenas conforme a altura do meio suporte, sendo diretamente proporcional à eficiência do filtro. Quanto maior a altura do filtro, maior será a eficiência do tratamento, justamente por obter mais tempo de detenção hidráulica e maior tempo de contato com o biofilme.

Schulze (1960) e Germain (1966) relacionam tempo de contato, profundidade e taxa de aplicação hidráulica. Assim, as variáveis que influenciam os resultados de dimensionamento a partir das equações de Schulze e Germain são a taxa de aplicação hidráulica e a altura do meio suporte. As relações estabelecidas entre as duas variáveis são diretamente proporcionais ao volume do meio suporte, ou seja, quanto maior for a taxa de aplicação hidráulica, maior será o volume necessário para atingir a mesma eficiência desejada, e quanto maior a altura, maior também será o volume.

A Equação de Eckenfelder (1961), por sua vez, define a remoção de DBO em função da profundidade do meio suporte e da taxa de aplicação hidráulica, da altura do meio suporte e da recirculação, sendo o volume calculado em função da taxa de aplicação hidráulica, da vazão e da altura do meio suporte.

As equações de NRC, Velz original e Eckenfelder não consideram diretamente a área superficial específica do meio suporte utilizado e, por esse motivo, não foi possível realizar comparações entre os resultados de DBO efluente e de volume do filtro ao alterar o meio suporte de pedra brita para plástico estruturado.

A equação de cálculo de volume sugerida por Jordão e Pessoa (2014) está em função da carga média de DBO afluente, calculada a partir da vazão, da concentração afluente e da carga orgânica volumétrica, esta última atribuída, sendo variáveis inversamente proporcionais ao volume do filtro, ou seja, quanto maior a carga orgânica volumétrica adotada, menor será o volume do meio suporte e maior será a taxa de aplicação hidráulica resultante.

A Equação de Velz modificada proposta por WEF (2011) considera, além das variáveis relacionadas nas equações anteriores, a taxa de aplicação hidráulica e a altura do meio suporte, a área superficial específica do meio suporte e a prática da recirculação, obtendo a DBO efluente em função da DBO afluente, da constante de tratabilidade, da área superficial específica do meio suporte, anteriormente não considerada para cálculos de degradação da matéria orgânica, da profundidade do meio suporte, da taxa de alimentação superficial do filtro, do coeficiente hidráulico, da temperatura e de um fator de correção da temperatura.

Por fim, o método internacional proposto pela DWA (2016) moderniza a Equação de Velz modificada, utilizando-a em termos de DQO para determinar concentrações de matéria orgânica ao longo da profundidade do filtro percolador, sendo a principal diferença a forma de cálculo segmentada e a estimativa da concentração de DQO efluente para cada segmento do filtro, determinando um perfil esperado de degradação da DQO em função da profundidade do meio suporte, podendo determinar a altura útil do filtro de acordo com o resultado do efluente desejado, segmento a segmento, atribuindo maior precisão aos resultados obtidos.

Na Equação de Velz modificada, a relação entre a taxa de aplicação hidráulica e a eficiência do filtro é inversamente proporcional, ou seja, quanto maior a taxa, menor a eficiência de remoção da matéria orgânica e maiores as concentrações de DBO e DQO. Já a relação entre a altura do meio suporte e a eficiência é diretamente proporcional, ou seja, para uma mesma taxa de aplicação hidráulica, ao aumentar a altura útil do meio suporte, o tempo de detenção hidráulica do filtro e o contato do efluente com o biofilme aumentam, resultando em uma maior eficiência do filtro.



Quanto à área superficial específica, a relação é diretamente proporcional à eficiência do tratamento. Quanto maior a área, mais taxa hidráulica e carga orgânica volumétrica pode ser aplicada, resultando em um mesmo efluente, desde que respeitadas as faixas indicadas pela literatura. A mesma relação direta é verificada para a recirculação, de tal forma que ao praticar a recirculação em um filtro que não operava com recirculação, a qualidade do efluente final obtida é mais elevada.

Ao comparar as dinâmicas das equações e os resultados das equações a partir das simulações de dimensionamento, o presente estudo aponta que as equações de NRC, Schulze e Germain, e Velz original são desatualizadas, que não utilizam variáveis que são importantes para representar matematicamente como seria o comportamento de um filtro percolador, não sendo indicada pelo presente estudo a utilização dessas equações.

Por outro lado, ao realizar as seções de cada simulação de dimensionamento utilizando as equações de Eckenfelder, Velz modificada e Velz modificada pela DWA, foram percebidas dinâmicas que representam melhor matematicamente as dinâmicas e o funcionamento de um filtro percolador, oferecendo resultados mais aproximados ao comportamento esperado para o filtro.

Ressalta-se que tais equações indicadas como mais apropriadas não consideram a carga orgânica volumétrica nos cálculos e que esta variável é apenas o resultado da carga orgânica em função do volume de meio suporte, devendo o dimensionamento ser revisado caso o valor resultante não seja compatível com o objetivo do filtro e com as faixas de valores sugeridas em literatura.

É importante ressaltar que tais equações devem ser aplicadas ponderando as constantes atribuídas em literatura e observando a possibilidade de ajuste de tais coeficientes. O presente estudo sugere a realização de experimentos para adequar os coeficientes utilizados nas equações, a partir de fatores de correção empíricos, uma vez que os valores adotados para essa simulação de dimensionamentos foram aqueles apresentados em literatura. Ao adequar coeficientes e constantes que definem as curvas das equações utilizando valores obtidos a partir de experimentos que retratam a realidade local e operacional, os resultados de dimensionamento indicarão com mais precisão a eficiência do tratamento a ser realizado no filtro que está sendo dimensionado, evitando dimensionamentos equivocados.

Deve-se sempre atentar para as verificações das recomendações de taxa hidráulica aplicada e carga orgânica volumétrica, pois matematicamente a proporção

é mantida para qualquer valor atribuído, porém as reações biológicas é que definem a dinâmica de funcionamento do filtro, podendo representar efeitos contrários ao esperado quando se utiliza valores não recomendados.

Ainda quanto à área superficial específica e à taxa de aplicação hidráulica, uma variável importante a ser ponderada é a eficiência de molhamento do meio suporte. Ao aumentar significativamente a área superficial específica, dependendo da taxa de aplicação hidráulica pode ocorrer casos em que o incremento de área não é efetivamente aproveitado pois a taxa de aplicação hidráulica não é suficiente para molhar a maior parte da superfície disponível, resultando em baixo desenvolvimento do biofilme e eficiência inferior à esperada. Isso pode acontecer principalmente ao trocar o meio suporte em pedra brita por plástico estruturado, por exemplo, em um filtro existente, sem observar se a taxa de aplicação hidráulica estará coerente às faixas sugeridas pela literatura para aquele material.

#### 4.1.2 Resultados de dimensionamento de filtros percoladores para degradação de matéria orgânica e conversão de nitrogênio e considerações

##### 4.1.2.1 Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf & Eddy para o cenário “CN”

A partir das equações de Daigger *et al.*, WEF e Pearce e Edwards, foram realizadas simulações para os filtros FP-CN1 e FP-CN2, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas para atender à principal condicionante do cenário “CN” para nitrificação, com concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de  $\text{NH}_4^+$  efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 11, para cada equação utilizada e para as diferentes seções de simulações calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 11 – Resultados obtidos a partir das equações propostas por Metcalf &amp; Eddy para o cenário “CN”

		1ª seção (TAH <sub>média</sub> ) (h=2,5, r=0)		2ª seção (variando TAH) (h=2,5, r=0)		3ª seção (variando TAH) (h <sub>brita</sub> =2,5, h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,0)		4ª seção (variando TAH) (h <sub>brita</sub> =2,5, h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,5)	
		FP-CN1	FP-CN2	FP-CN1	Pedra brita	FP-CN2	Plástico estruturado	FP-CN1	FP-CN2
Identificação do filtro percolador		Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado
Identificação das células		(I)	(J)	(K)	(L)	(M)	(N)	(O)	(P)
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(45)	50	150	50	150	-	150	50	150
Altura útil do meio suporte (m)	(46)	2,5	2,5	2,5	2,5	-	6,0	2,5	6,0
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(47)	3,0	42,5	1,2	3,7	-	8,8	1,4	10,3
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(48)	0,14	2,04	0,06	0,18	-	0,18	0,04	0,14
Carga volumétrica de NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (kg/m <sup>3</sup> ·d NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )		0,03	0,43	0,01	0,04	-	0,04	0,01	0,03
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(49)	0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,5	0,5
Área superficial total disponível (m <sup>2</sup> )	(50)	833.333	176.471	2.083.333	2.027.027	-	2.045.455	2.678.571	2.621.359
Volume (m <sup>3</sup> )	(51)	16.667	1.176	41.667	13.514	-	13.636	53.571	17.476
Taxa de oxidação volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d) (Daigger <i>et al</i> )	(52)	0,14	1,96	0,06	0,17	-	0,17	0,06	0,18
Taxa específica de nitrificação (g/m <sup>2</sup> ·d) (WEF)	(53)	0,58	2,73	0,23	0,24	-	0,24	0,25	0,26
NH <sub>4</sub> efluente (g/m <sup>3</sup> ) (mg/l) (Pearce e Edwards)	(54)	6,26	-	0,84	0,89	-	0,88	0,84	0,88

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.2 e 2.5.2.5, na revisão de literatura. <sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”.

Na primeira seção, para o filtro FP-CN1, a taxa hidráulica média aplicada não foi suficiente para a nitrificação total do efluente, sendo obtida uma remoção de 75 % de nitrogênio amoniacal (célula I54). Já para o filtro FP-CN2, a elevada taxa de aplicação hidráulica resultou em um volume 14 vezes menor, se comparado ao volume obtido no FP-CN1 (comparar células I51 e J51), elevando a taxa de oxidação volumétrica e a taxa específica de nitrificação, não sendo possível obter redução de nitrogênio amoniacal estimada a partir da Equação de Pearce e Edwards. A equação resultou em um valor de concentração de nitrogênio amoniacal no efluente superior ao valor do afluente, indicando inconsistência do resultado, sendo, portanto, desconsiderado na análise de dimensionamento.

Na segunda seção, a taxa de aplicação hidráulica dos filtros FP-CN1 e FP-CN2 foram ajustadas (célula K47 e L47) para que a concentração de  $\text{NH}_4^+$  estimada fosse inferior a 1 mg/l. Para o filtro FP-CN1, ao reduzir a taxa de aplicação hidráulica (comparar células I47 e K47), o volume total necessário de meio suporte aumentou (comparar células I51 e K51), resultando em um efluente com concentração de nitrogênio amoniacal inferior a 1 mg/l e resultando na nitrificação total do efluente (célula K54). Da mesma forma, ajustando a taxa de aplicação hidráulica do filtro FP-CN2, foi possível obter concentração inferior a 1 mg/l de  $\text{NH}_4^+$  (célula L54). Comparando os resultados dos filtros FP-CN1 e FP-CN2 na segunda seção, a diferença entre os valores obtidos para a área superficial específica total disponível para crescimento do biofilme foi da ordem de 2 % apenas (comparar células K50 e L50), enquanto o volume total necessário de meio suporte foi 3 vezes superior para o filtro FP-CN1 em brita (comparar células K51 e L51).

Na terceira seção, foi atribuído um incremento de altura do meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado, já que este material permite a concepção de filtros com maior profundidade. Ao comparar os resultados obtidos para o filtro FP-CN2 na segunda seção com altura reduzida (coluna L) e na terceira seção com incremento de altura (coluna N), foram verificados valores semelhantes para área superficial específica total, volume total, taxa de oxidação volumétrica e taxa específica de nitrificação, resultando na mesma eficiência quanto à remoção de nitrogênio amoniacal, sendo a única diferença significativa a taxa de aplicação hidráulica. Nessa seção, a taxa de aplicação hidráulica foi 2,4 vezes maior se comparada à taxa aplicada na segunda seção para o filtro FP-CN2 (comparar células L47 e N47).

O filtro FP-CN2 calculado na terceira seção representa uma situação mais favorável ao plástico estruturado, se comparado ao dimensionado na segunda seção, principalmente porque utilizou-se do benefício da maior altura para o filtro percolador, possibilitando atribuir uma taxa de aplicação hidráulica maior, favorecendo aspectos relevantes como a eficiência de molhamento da superfície específica do material, a disponibilidade de alimento para os microorganismos e o desenvolvimento do biofilme, proporcionando condições adequadas para o atingimento do objetivo proposto para o tratamento.

Na quarta seção, foi atribuída recirculação para os filtros FP-CN1 e FP-CN2, com diferentes alturas de meio suporte. Para o FP-CN1 em brita, os resultados obtidos na quarta seção foram comparados aos obtidos na segunda seção (comparar colunas K e O). Já para o FP-CN2 em plástico estruturado, a comparação foi realizada entre os resultados da terceira e da quarta seção (comparar colunas N e P).

Para o FP-CN1, a recirculação de 50 % da vazão (célula O49) implicou em um aumento de 16 % da taxa de aplicação hidráulica e de 28 % do volume total necessário, enquanto para o FP-CN2, foi possível aumentar a taxa de aplicação hidráulica em 17 %, resultando em um volume 28 % maior, sendo as duas situações, portanto, com incrementos de taxa de aplicação hidráulica e volume proporcionais e semelhantes.

A avaliação quando da concepção do projeto deve considerar aspectos financeiros e técnicos para optar por uma ou outra configuração. Deve-se ponderar que a recirculação é importante para filtros que objetivam a nitrificação, já que a taxa de aplicação hidráulica tende a ser reduzida para atingir tal objetivo, podendo implicar em baixa eficiência de molhamento do meio suporte e limitações para o desenvolvimento do biofilme, refletindo diretamente na eficiência do tratamento.

#### 4.1.2.2 Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário "CN"

A partir da Equação de WEF e de uma sequência de verificações matemáticas proposta por Jordão e Pessoa, foram realizadas simulações para os filtros FP-CN3 e FP-CN4, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas

para atender à principal condicionante do cenário “CN” para nitrificação, com concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de  $\text{NH}_4^+$  efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 12, para cada equação utilizada e para as diferentes seções calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 12 – Resultados obtidos a partir das equações propostas por Jordão e Pessoa para o cenário “CN”

	1ª seção (TAH <sub>média</sub> ) (h=2,5, r=0)		2ª seção (variando TAH) (h=2,5, r=0)		3ª seção (variando TAH) (h <sub>brita</sub> =2,5, h <sub>plástico</sub> =6) (r=0)		4ª seção (variando TAH) (h <sub>brita</sub> =2,5, h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,5)	
	FP-CN3	FP-CN4	FP-CN3	FP-CN4	FP-CN3	FP-CN4	FP-CN3	FP-CN4
Identificação do filtro percolador	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado	Pedra brita	Plástico estruturado
Meio suporte	(I)	(J)	(K)	(L)	(M)	(N)	(O)	(P)
Identificação das células								
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(55) 50	150	50	150	-	150	50	150
Altura útil do meio suporte (m)	(56) 2,5	2,5	2,5	2,5	-	6,0	2,5	6,0
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(57) 3,0	42,5	1,9	1,9	-	4,7	9,0	23,0
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(58) 0,14	2,04	0,09	0,09	-	0,09	0,09	0,09
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(59) 0,0	0,0	0,0	0,0	-	0,0	0,5	0,5
Taxa específica de nitrificação (g/m <sup>2</sup> ·d) (WEF)	(60) 0,53	0,53	0,53	0,53	-	0,53	0,60	0,60
Área superficial do FP (m <sup>2</sup> )	(61) 6.667	471	10.526	10.526	-	4.255	3.333	1.304
Volume (m <sup>3</sup> )	(62) 16.667	1.176	26.316	26.316	-	25.532	8.333	7.826
Área de contato total (Volume·A <sub>esp</sub> ) (m <sup>2</sup> )	(63) 833.333	176.470	1.315.789	3.947.368	-	3.829.787	416.667	1.173.913
Taxa de DBO por área de contato (g/m <sup>2</sup> ·d)	(64) 2,88	0,85	1,82	0,61	-	0,63	7,49	2,66
Nitrificação estimada (%)	(65) 80,0	-	96,4	96,4	-	96,4	96,4	96,4
Concentração de NH <sub>4</sub> efluente (mg/l)	(66) 5,0	-	0,9	0,9	-	0,9	0,9	0,9

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.3 e 2.5.2.5, na revisão de literatura.<sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”.



Na primeira seção, os valores médios adotados para as taxas de aplicação hidráulica para os filtros FP-CN3 e FP-CN4 (células I57 e J57) não foram suficientes para a nitrificação total do efluente. Para o FP-CN3, em brita, foi obtida eficiência estimada de 80,0 % (célula I65), resultando em uma concentração de  $\text{NH}_4^+$  estimada em 5,0 mg/l (célula I66). Já para o filtro FP-CN4, em plástico, a elevada taxa de aplicação hidráulica resultou em um volume 14 vezes inferior, se comparado ao volume obtido no FP-CN3 (comparar células I62 e J62), não sendo possível obter redução de nitrogênio amoniacal a partir das relações matemáticas estabelecidas. A equação resultou em um valor de concentração de nitrogênio amoniacal no efluente superior ao valor do afluente, indicando inconsistência do resultado, sendo, portanto, desconsiderado na análise de dimensionamento.

A partir da segunda seção, as taxas de aplicação hidráulica dos filtros FP-CN3 e FP-CN4 foram ajustadas para que a concentração de  $\text{NH}_4^+$  estimada fosse inferior a 1 mg/l. Para tal, foi necessário atribuir taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas que resultassem em uma eficiência de 96,4 %.

Na segunda seção, para o filtro FP-CN3, ao reduzir a taxa de aplicação hidráulica (comparar células I57 e K57), o volume total necessário de meio suporte aumentou (comparar células I62 e K62), resultando na nitrificação total do efluente, com concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1,0 mg/l (célula K66). Da mesma forma, ajustando a taxa de aplicação hidráulica para o filtro FP-CN4, foi possível obter concentração inferior a 1 mg/l de  $\text{NH}_4^+$  (célula L66). A diferença observada entre os filtros FP-CN3 e FP-CN4 para a segunda seção foi em relação à área de contato total e à taxa de DBO por área de contato (comparar células K63 e L63 e células K64 e L64).

Na terceira seção, foi atribuído um incremento de altura do meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado, já que este material permite a concepção de filtros com maior profundidade. Ao comparar todos os resultados obtidos para o filtro FP-CN2 na segunda seção com altura reduzida (coluna L) e na terceira seção com incremento de altura (coluna N), foram verificados valores semelhantes para área de contato total ou área superficial específica total, volume total e taxa de DBO por área de contato, resultando na mesma eficiência quanto à remoção de nitrogênio amoniacal, sendo a única diferença significativa a área da superfície do filtro (comparar células L61 e N61) e, portanto, a taxa de aplicação hidráulica (comparar células L57 e N57). Nessa seção, a taxa de aplicação hidráulica foi 2,5 vezes maior

se comparada à taxa aplicada na segunda seção para o filtro FP-CN2 (comparar células L57 e N57).

O filtro FP-CN4 calculado na terceira seção representa uma situação mais favorável ao plástico estruturado, se comparado ao dimensionado na segunda seção, principalmente porque utilizou-se do benefício da maior altura para o filtro percolador, possibilitando atribuir uma taxa de aplicação hidráulica maior, favorecendo aspectos relevantes como a eficiência de molhamento da superfície específica do material, a disponibilidade de alimento para os microorganismos e o desenvolvimento do biofilme, proporcionando condições adequadas para o atingimento do objetivo proposto para o tratamento.

Na quarta seção, foi atribuída recirculação para os filtros FP-CN3 e FP-CN4, com diferentes alturas de meio suporte. Para o FP-CN3 em brita, os resultados obtidos na quarta seção foram comparados aos obtidos na segunda seção (comparar colunas K e O). Já para o FP-CN4 em plástico estruturado, a comparação foi realizada entre os resultados da terceira e da quarta seção.

Para o FP-CN3, a recirculação de 50 % da vazão (célula O49) implicou em um aumento de 4,7 vezes da taxa de aplicação hidráulica e uma redução de 3,2 vezes do volume total necessário, enquanto para o FP-CN4, foi possível aumentar a taxa de aplicação hidráulica em 4,9 vezes, resultando em um volume 3,3 vezes maior.

A avaliação quando da concepção do projeto deve considerar aspectos financeiros e técnicos para optar por uma ou outra configuração. Deve-se ponderar que a recirculação é importante para filtros que objetivam a nitrificação, já que a taxa de aplicação hidráulica tende a ser reduzida, podendo representar baixa eficiência de molhamento do meio suporte e limitações para o desenvolvimento do biofilme, refletindo diretamente na eficiência do tratamento.

#### 4.1.2.3 Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário "CN"

A partir do método DWA, que inclui a Equação de Velz modificada pela DWA, a Equação de Gujer e Boller e a relação de nitrogênio amoniacal incorporado à biomassa ao longo de toda a profundidade do filtro, obtida em função da quantidade de DQO removida, foram realizadas simulações para os filtros FP-CN5 e FP-CN6, com pedra brita e com plástico estruturado, respectivamente, apresentando diferentes

volumes de meio suporte em função das variáveis atribuídas e manipuladas para atender à principal condicionante do cenário “CN” para nitrificação, com concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1 mg/l.

Os valores atribuídos às variáveis e os resultados de concentração de  $\text{NH}_4^+$  efluente e de volume útil total necessário estão apresentados no Quadro 13, para cada equação utilizada e para as diferentes seções de simulações calculadas.

As colunas e linhas, que apresentam as principais variáveis atribuídas e os resultados obtidos a partir da aplicação das equações, foram identificadas com letras e números, respectivamente, objetivando facilitar a leitura, a interpretação e as discussões para cada seção de simulação realizada.

Quadro 13 – Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário “CN”

		1ª seção (TAH <sub>médica</sub> ) (h=2,5, r=0)			2ª seção (variando TAH) (h=2,5, r=0)			3ª seção (variando TAH) (r=0,5)			4ª seção (variando TAH) (h <sub>plástico</sub> =6) (r=0,5)		
		FP-C5	FP-C6		FP-C5	FP-C6		FP-C5	FP-C6		FP-C5	FP-C6	
Identificação do filtro percolador		Pedra brita	Plástico estruturado		Pedra brita	Plástico estruturado		Pedra brita	Plástico estruturado		Pedra brita	Plástico estruturado	
Meio suporte		(I)	(J)		(K)	(L)		(M)	(N)		(O)	(P)	
Identificação das células													
Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	(67)	50	150		50	150		50	150		-	150	
Altura útil do meio suporte (m)	(68)	2,5	2,5		2,5	2,5		2,5	2,5		-	6,0	
Taxa de aplicação hidráulica (m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> ·d)	(69)	3,0	42,5		1,6	8,9		3,64	19,7		-	40,5	
Carga orgânica volumétrica (kg/m <sup>3</sup> ·d DBO)	(70)	0,14	2,04		0,08	0,43		0,16	0,88		-	0,75	
Razão de recirculação (r = Q <sub>Rec</sub> /Q <sub>Afluente</sub> )	(71)	0,0	0,0		0,0	0,0		0,5	0,5		-	0,5	
DQO <sub>efluente</sub> (mg/l) (Velz modificada - DWA)	(72)	48,5	64,3		28,4	17,0		29,6	18,4		-	15,5	
DBO <sub>efluente</sub> (mg/l) (Velz modificada DWA) (estimativa DQO/DBO=4)	(73)	12,1	16,1		7,1	4,3		7,4	4,6		-	3,9	
NH <sub>4</sub> efluente (mg/l) (Gujer e Boller - DWA)	(74)	19,8	23,5		0,4	0,6		0,7	0,7		-	0,7	
Nitrificação	(75)	Baixa	Baixa		Total	Total		Total	Total		-	Total	
Volume total do meio suporte (m <sup>3</sup> )	(76)	16.619	1.178		31.669	5.620		20.629	3.801		-	4.441	

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** As equações e a identificação das variáveis que compõem cada equação estão apresentadas nos itens 2.5.2.4 e 2.5.2.5, na revisão de literatura. <sup>(2)</sup> As variáveis que não influenciam as equações estão descritas em cinza. <sup>(3)</sup> Quando a variável não era considerada na equação e os resultados da seção se mantinham iguais à outra seção realizada, a apresentação de dados de entrada e de resultados foi dispensável e os campos foram preenchidos com “-”.

Na primeira seção, em função das definições de taxas de aplicação hidráulica para brita em baixa taxa no FP-CN5 e para plástico em alta taxa no FP-CN6, as condições de taxa de aplicação hidráulica são muito distintas (comparar células I69 e J69), resultando também em volumes muito distintos (comparar células I76 e J76) e em cargas orgânicas volumétricas compatíveis com baixa taxa para a brita e com alta taxa para o plástico (comparar células I70 e J70).

Os resultados obtidos na primeira seção não atingiram a nitrificação, sendo apenas sinalizado um início de atividade autotrófica, verificada com a redução da concentração de nitrogênio amoniacal em 21 % para o filtro FP-CN5 e de apenas 6 % para o filtro FP-CN6 (comparar células I74 e J74), em relação à caracterização do afluente ao filtro.

Na segunda seção, foram ajustadas as taxas de aplicação hidráulica visando à nitrificação total, ou seja, à concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1 mg/l. Para o filtro FP-CN6 em plástico, foi possível obter a nitrificação total com um volume 5,6 vezes menor se comparado ao obtido para o filtro FP-CN5 em brita (comparar células K76 e L76). No entanto, a taxa de aplicação hidráulica aplicada (célula L69) no FP-CN6, assim como a carga orgânica volumétrica resultante (célula L70), são inferiores à recomendada para meio suporte plástico, sendo possível, então, que o filtro não apresente tal desempenho na prática, em função da baixa eficiência de molhamento do meio suporte e deficiência de alimentação e desenvolvimento do biofilme. Para adequar as taxas e cargas aplicadas ao dimensionamento do FP-CN6, seria necessário atribuir uma razão de recirculação ou ainda ajustar a altura do filtro, utilizando, assim, as vantagens oferecidas pelo meio suporte plástico estruturado, relacionadas à maior capacidade de assimilação de taxas hidráulicas e cargas orgânicas mais elevadas e à capacidade de empilhamento do meio suporte sem prejudicar a aeração natural do filtro percolador. Tais adequações foram simuladas nas seções seguintes.

Na terceira seção, foi simulada a prática de recirculação, atribuindo uma razão de recirculação de 50 % (células M71 e N71). Tanto no filtro FP-CN5 quanto no filtro FP-CN6 foi possível elevar a taxa de aplicação hidráulica em aproximadamente 2,2 vezes (comparar células K69 e M69 e células L69 e N69), obtendo volumes cerca de 1,5 vezes menores (comparar células K76 e M76 e células L76 e N76), resultando também em cargas orgânicas volumétricas mais favoráveis e adequadas ao que recomenda a literatura (comparar células K70 e M70 e células L70 e N70).

Ao analisar os resultados dos filtros FP-CN5 e FP-CN6 obtidos na terceira seção, observa-se que a taxa hidráulica aplicada no FP-CN6 foi 5,4 vezes superior à aplicada no FP-CN5 (comparar células M69 e N69) e que o volume para o filtro FP-CN6 em plástico foi 5,4 vezes menor se comparado ao volume necessário para o filtro FP-CN5 em brita (comparar células M76 e N76).

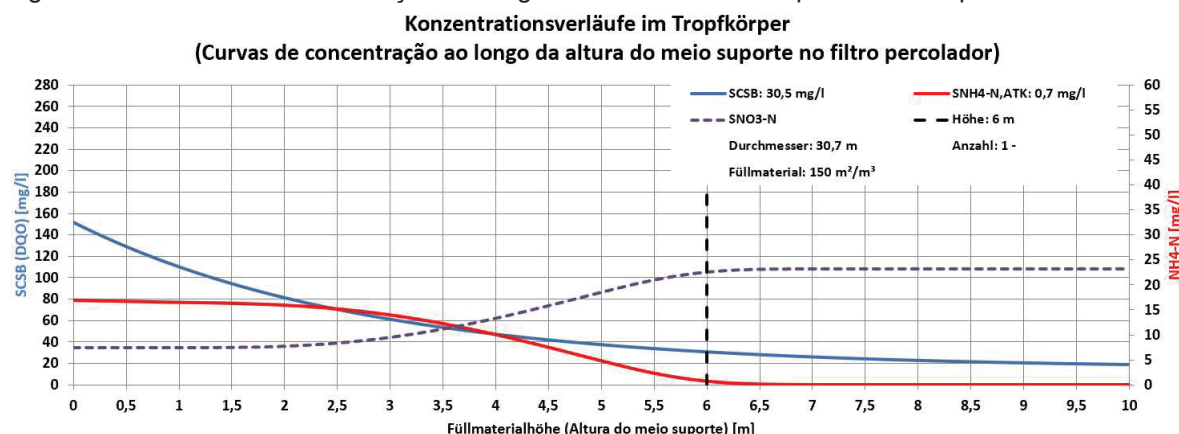
A prática de recirculação proporcionou uma situação de atendimento ao objetivo de nitrificação total com a redução do volume total necessário e com o aumento da taxa hidráulica e da carga orgânica, oferecendo melhores condições para o desenvolvimento do biofilme.

Na quarta seção, a altura útil do meio suporte plástico foi alterada (célula P68), refletindo no aumento do volume (comparar células N76 e P76), sendo necessário alterar a taxa de aplicação hidráulica em relação à adotada na terceira seção (comparar células N69 e P69) para obter a mesma concentração final de nitrogênio amoniacal no efluente final.

O aumento da altura do meio suporte no caso do plástico estruturado resultou em maior volume, se comparado ao obtido na terceira seção, porém o tempo de contato entre o efluente em tratamento e o biofilme é mais de duas vezes superior, em função da maior profundidade do filtro, resultando em uma melhor degradação da matéria orgânica e na nitrificação total, principal objetivo das simulações realizadas para o cenário "CN".

Para exemplificar a utilização do método DWA (2016) e o gráfico da degradação de matéria orgânica e da realização da nitrificação, na Figura 21 estão apresentadas as curvas de decaimento da DQO e de conversão de nitrogênio amoniacal,  $\text{NH}_4^+$ , em nitrato,  $\text{NO}_3$ , obtidas ao longo da profundidade do filtro FP-CN6 com altura igual a 6,0 m e meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, conforme calculado na quarta seção.

Figura 21 – Curvas de concentração ao longo da altura do meio suporte no filtro percolador FP-CN6



FONTE: O Autor (2017).

#### 4.1.2.4 Comparações entre as equações referentes à nitrificação e discussões

Quanto às equações e variáveis utilizadas para os cálculos de conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato, Daigger *et al.* (1994) definiram a oxidação de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal a partir de uma taxa de oxidação volumétrica.

WEF (2000) apresentou uma relação entre taxa específica de nitrificação e a razão DBO/NTK, estabelecida para temperaturas entre 9 e 20 °C. A partir da vazão e da altura previamente estabelecidas, ao variar a taxa de aplicação hidráulica foi possível estabelecer a área superficial do filtro e o volume de meio suporte total necessário, sendo a taxa de aplicação hidráulica inversamente proporcional à área superficial e ao volume total. As concentrações de carbono e nitrogênio afluentes determinam a taxa específica de nitrificação a partir da relação estabelecida na equação proposta pela WEF.

Também a partir das concentrações afluentes e taxas superficiais específicas de aplicação de DBO e de  $\text{NH}_4^+$ , bem como da área superficial específica do material utilizado como meio suporte, da taxa de aplicação hidráulica específica e da temperatura, a Equação de Pearce e Edwards (2011) resulta na estimativa de concentração de  $\text{NH}_4^+$  no efluente final, calculando a taxa específica de nitrificação a partir das taxas de aplicação superficiais determinadas para DBO e  $\text{NH}_4^+$ .

A sequência de cálculo proposta por Jordão e Pessoa também utiliza a mesma Equação de WEF e relações matemáticas complementares para determinar a geometria do filtro a ser dimensionado, sendo que as variáveis taxa de aplicação hidráulica, taxa volumétrica de DBO e taxa de DBO por área de contato total são



valores verificados a partir de parâmetros definidos em literatura. Nessa sequência de cálculo, portanto, não é apresentada uma equação específica que estima a concentração de  $\text{NH}_4^+$ , mas sim uma estimativa de eficiência conforme o objetivo de tratamento, adequando os demais parâmetros para obter tal eficiência esperada.

As simulações realizadas no presente estudo adaptaram essa sequência de cálculo de forma que fosse possível variar a taxa de aplicação hidráulica visando atingir a eficiência de 96,4 %, necessária para obter concentração de  $\text{NH}_4^+$  inferior a 1,0 mg/l, considerando a concentração afluente ao filtro definida. Assim, atribuída a taxa de aplicação hidráulica, a partir da vazão afluente foi possível determinar a área superficial, o volume e a carga orgânica volumétrica ou taxa volumétrica de DBO. Determinando o material a ser utilizado como meio suporte e sua respectiva área superficial específica, determinou-se, então, a área de contato total disponível para crescimento do biofilme e a taxa de aplicação de DBO por área de contato.

Considerando que não foi indicada equação para determinação da concentração de  $\text{NH}_4^+$  e considerando que outras literaturas também sugerem a utilização da Equação de WEF para determinar a taxa de nitrificação, complementando o método de dimensionamento com equações específicas para estimar a concentração de nitrogênio amoniacal no efluente, o presente estudo não sugere a utilização da sequência de cálculo proposta por Jordão e Pessoa para dimensionamento de filtros percoladores.

Gujer e Boller (1986) estabeleceram empiricamente a relação entre  $\text{NH}_4^+$  afluente e efluente, estabelecendo a taxa de nitrificação por área do biofilme. O método internacional proposto pela DWA (2016) utilizou a Equação de Gujer e Boller (1986) para estimar a conversão de nitrogênio e considerou ainda que ocorre uma incorporação de  $\text{NH}_4^+$  na biomassa. Para quantificar esta incorporação, a DWA (2016) determinou uma relação entre a degradação de DQO e a remoção de  $\text{NH}_4^+$ , estabelecendo uma razão de nitrogênio amoniacal incorporado e retido na biomassa para cada mg de DQO degradada, sendo este cálculo realizado ao longo de toda a profundidade do filtro, segmento a segmento.

Como o cálculo para remoção de carbono e conversão de nitrogênio proposto pela DWA (2016) é segmentado por camadas do filtro, o método sugere a aplicação da Equação de Gujer & Boller (1986) apenas a partir do momento em que a DQO for inferior a 100 mg/l, sendo que entre 100 e 20 mg/l de DQO, o método determinou um coeficiente de ponderação a ser considerado em função da influência da atividade das

bactérias heterotróficas em relação às autotróficas. A partir do segmento em que a DQO passa a ser inferior a 20 mg/l, considera-se nula tal interferência no processo de nitrificação e a Equação de Gujer & Boller é utilizada sem o coeficiente de ponderação.

O método internacional proposto pela DWA (2016) considerou ainda na Equação de Gujer & Boller (1986) uma variável relacionada a possíveis falhas de crescimento do biofilme, o fator “*patchy*”. Este fator é um fator de segurança em relação à nitrificação, pois pondera que pode haver pontos no meio suporte em que o biofilme não se desenvolveu, ou seja, que o desenvolvimento do biofilme não é regular ao longo de toda área superficial do meio suporte.

Assim como para o cálculo da degradação de carbono, o cálculo segmentado da conversão de nitrogênio possibilita obter a estimativa de concentração efluente de cada camada do filtro, determinando um perfil esperado de evolução da nitrificação em função da profundidade do meio suporte e determinando a altura útil final do filtro de acordo com o resultado do efluente desejado, segmento a segmento, tornando o cálculo mais preciso.

O cálculo segmentado, a utilização de uma ponderação na Equação de Gujer & Boller e a utilização do fator “*patchy*” aproximam os cálculos às condições reais do filtro e agregam precisão aos resultados obtidos. Assim, o presente estudo recomenda a utilização do método DWA (2016) para dimensionamento de filtros percoladores, ressaltando que é importante elaborar validações a partir da análise e estudo estatístico dos resultados das ETEs em operação, comparando os resultados obtidos em escala operacional com resultados de simulações, adequando coeficientes ou constantes e aplicando fatores de correção empíricos para que as curvas das equações representem os modelos operados, possibilitando a maior assertividade quando do dimensionamento de filtros percoladores, evitando, assim dimensionamentos equivocados e filtros que não respondem ao objetivo proposto pelo dimensionamento de projeto.

## 4.2 ESGOTAMENTO SANITÁRIO NO BRASIL E LEVANTAMENTO DOS PROCESSOS UNITÁRIOS UTILIZADOS NAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO NO PARANÁ

### 4.2.1 Processos unitários empregados nas ETEs no Paraná e considerações sobre a aplicabilidade do estudo para a Sanepar

O Estado do Paraná é composto por 399 municípios, sendo 346 atendidos pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Desses, 179 possuem sistema de esgotamento sanitário compostos por 247 estações de tratamento de esgoto, com processos unitários físicos, biológicos e químicos, anaeróbios e aeróbios.

Das 247 ETEs levantadas, 233 possuem reatores anaeróbios, representando quase 95 % das ETEs da Sanepar. Destas, 77 realizam pós tratamento por meio de filtros anaeróbios; 59 com sistema de lagoas, anaeróbias, facultativas ou aeradas, combinadas ou não; 27 com filtros percoladores; 8 com filtros aerados submersos; 6 com sedimentadores lamelares; e 11 com processos quimicamente assistidos, como flotação por ar dissolvido ou decantação acelerada. As outras 45 ETEs com reatores anaeróbios não possuem nenhum processo unitário para pós tratamento.

Ainda, 10 ETEs são compostas apenas por sistema com lagoas, sem reatores, e, por fim, outras 4 ETEs operam apenas com sistema de lodos ativados.

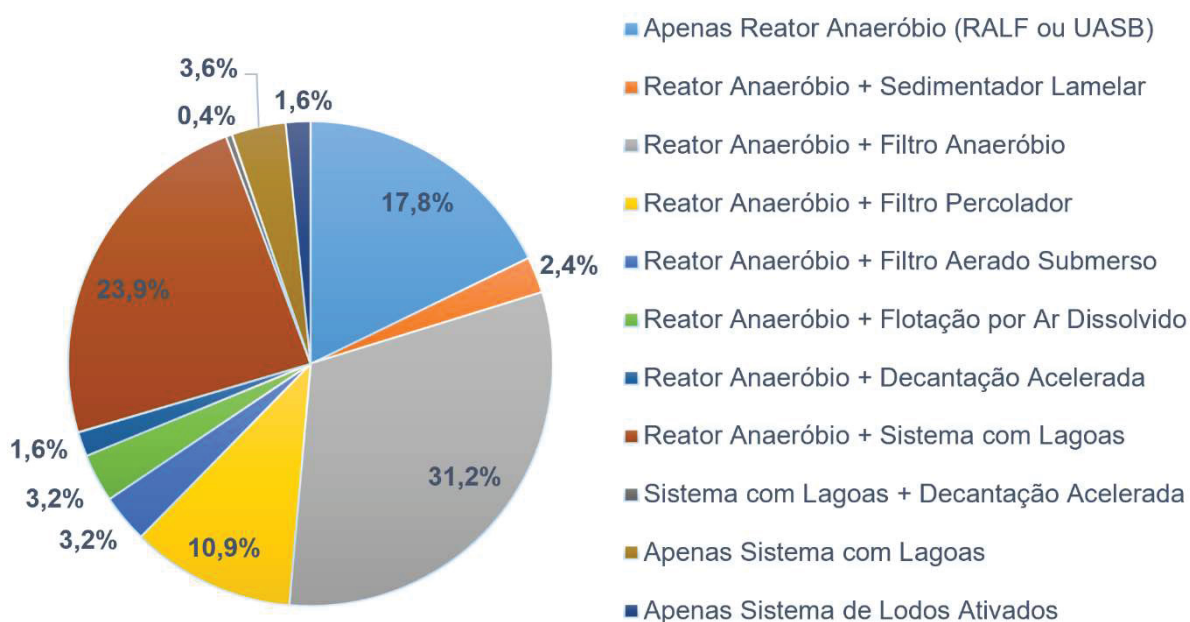
A partir do levantamento realizado, verificou-se a aplicabilidade direta do presente estudo em 11 % das ETEs, por possuírem filtros percoladores como pós tratamento de reatores anaeróbios. As práticas e os detalhes técnicos e operacionais discutidos podem ser utilizados para melhoria dos processos unitários e da eficiência do tratamento realizado nessas ETEs.

Verificou-se que outros 18 % das ETEs possuem apenas reatores anaeróbios. Sabendo que os reatores anaeróbios possuem eficiência limitada, na maioria dos casos não suficiente para atendimento dos limites de lançamento exigidos, estima-se que para essa parcela de estações pode ser necessário implantar processos complementares visando à melhoria da qualidade do efluente final. Para muitos casos, os filtros percoladores podem atender satisfatoriamente as exigências ambientais e a qualidade do efluente final requerida pelas outorgas e licenças ambientais, sendo uma opção de processo unitário que agrega características sustentáveis a uma ETE, uma

vez considerado o baixo consumo de energia e de produtos químicos e a simplicidade de funcionamento, operação e manutenção.

O gráfico apresentado na Figura 22 ilustra os processos unitários que compõem as ETEs operadas pela Sanepar levantadas no presente estudo.

Figura 22 – Processos unitários que compõem as ETEs da Sanepar



FONTE: O Autor (2017).

**Nota:** Os sistemas com filtros percoladores, filtros aerados submersos e lodos ativados possuem decantadores secundários.

Por fim, os aspectos nesse estudo discutidos poderão também subsidiar decisões para implantação de novas estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores visando ampliação do atendimento de coleta e tratamento de esgoto à população. Para estes casos, os resultados e as discussões apresentadas nesse estudo poderão ser utilizados desde a concepção até a operação e a manutenção de uma ETE com filtros percoladores.

### 4.3 RELAÇÃO DAS ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ESGOTO ANALISADAS NO PARANÁ E NO SUL DA ALEMANHA

#### 4.3.1 Estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores analisadas no Paraná

Dentre todas as ETEs operadas pela Sanepar no Paraná, 27 possuem filtros percoladores. A indicação das ETEs no mapa do Estado do Paraná está apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Indicação de municípios que possuem ETEs com filtros percoladores no Paraná



FONTE: Adaptação de mapa do Brasil e do Estado do Paraná realizada pelo Autor (2017).

#### 4.3.2 Estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores analisadas na Alemanha

Na Alemanha, três ETEs com filtros percoladores foram visitadas e analisadas, sendo uma de pequeno porte e uma de grande porte na região metropolitana de *Stuttgart*, no Estado de *Baden-Württemberg*, e uma de médio porte no município de *Kempton*, no Estado de *Bayern*, conforme mostrado no Quadro 14 e na Figura 24.

Quadro 14 – Relação de ETEs analisadas e visitadas no Sul da Alemanha

		Município	ETE
Alemanha	1	<i>Neuhausen</i>	ETE <i>Neuhausen</i>
	2	<i>Sindelfingen</i>	ETE <i>Böblingen-Sindelfingen</i>
	3	<i>Kempton</i>	ETE <i>Kempton</i>

FONTE: O Autor (2017).

Figura 24 – Indicação da localização das ETEs visitadas no Sul da Alemanha



FONTE: Adaptação de mapa da Alemanha e dos Estados de *Baden-Württemberg* e *Bayern* realizada pelo Autor (2017).

#### 4.4 DESCRITIVO DAS ETES COM FILTROS PERCOLADORES ANALISADAS NO PARANÁ E NA ALEMANHA

Este item descreve os principais aspectos e características observadas nas estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores visitadas no Paraná e no Sul da Alemanha, bem como aponta e relata dificuldades e problemas mais recorrentes e soluções implantadas.

A sequência de subitens apresentados segue a mesma sequência estabelecida na Revisão de Literatura. A partir de abordagens teóricas e práticas, são discutidos os aspectos que influenciam o bom funcionamento de uma ETE com filtros percoladores, incluindo aspectos dos processos e equipamentos a montante dos filtros, aspectos e detalhes dos filtros percoladores e, por fim, dos processos a jusante dos filtros.

Para cada aspecto abordado, é estabelecido uma abordagem que inclui o que foi estudado e o que foi observado ao longo das análises e das visitas às ETEs no Paraná e no Sul da Alemanha, utilizando-se de fatos e experiências em escala operacional para exemplificar o que foi verificado em literatura.

#### 4.4.1 Processos unitários empregados a montante do filtro percolador nas ETEs visitadas

Os subitens a seguir descrevem o que foi observado durante as visitas e o que foi relatado pela operação referente às etapas de tratamento e aos equipamentos a montante do filtro percolador.

##### 4.4.1.1 Retenção de sólidos grosseiros

Dentre as ETEs analisadas no Paraná, todas possuem sistema preliminar com gradeamento médio de 20 mm. Das 27 ETEs analisadas, em apenas 7 foi verificado gradeamento ou peneiramento fino de 10 ou 6 mm instalado após o gradeamento médio.

Para ETEs de menor porte, predomina o emprego de gradeamento manual. Já em algumas das ETEs de maior porte, o gradeamento médio é manual ou mecanizado e o gradeamento fino ou o peneiramento fino é mecanizado, sendo mais comum o uso de gradeamento com esteira tipo *step screen*.

Em algumas das ETEs com gradeamento duplo, a grade fina não foi prevista em projeto e foi, portanto, instalada posteriormente. Nesses casos, após a instalação do gradeamento adicional, foi possível perceber melhoria na operação do reator anaeróbio e do filtro percolador em função da maior retenção de sólidos grosseiros na etapa preliminar, refletindo no aumento da qualidade do efluente final.

A não utilização do gradeamento fino ou peneiramento fino implica em uma maior quantidade de sólidos grosseiros que segue para as etapas seguintes de tratamento, prejudicando a operação e reduzindo a eficiência dos decantadores primários ou dos reatores anaeróbios, e, principalmente, dos filtros percoladores, acelerando processos de colmatação do meio suporte e provocando obstrução e entupimento no sistema de distribuição afluente.

Em algumas ETEs que estão há mais tempo em operação, foi observada significativa corrosão dos equipamentos de gradeamento manual. Já em ETEs recentemente implantadas, foi verificado que o gradeamento, manual ou mecanizado, instalado é de material resistente à corrosão, representando uma melhoria já aplicada.

Para todas as ETEs com filtro percolador é recomendada a instalação de gradeamento ou peneiramento fino, com espaçamento igual a 10, 6 ou até 3 mm,



fabricado com materiais resistentes à corrosão, sempre precedido de gradeamento médio para retenção de sólidos mais grosseiros e para a proteção mecânica dos equipamentos de gradeamento ou peneiramento fino mecanizados.

Nas ETEs do Paraná, os resíduos retidos no gradeamento de operação manual são normalmente dispostos em uma laje perfurada para desaguamento no próprio canal do sistema preliminar. Após seco, é adicionada uma fina camada de cal para evitar odores e moscas. O material é ensacado ou disposto em caçambas e, posteriormente, transportado e destinado a um aterro sanitário. O local onde ficam as caçambas que armazenam os resíduos possuem sistema de drenagem para conduzir eventual líquido percolado novamente ao início do tratamento.

A Figura 25 exemplifica o sistema preliminar de uma ETE de médio porte composto por gradeamento médio manual e peneira fina rotativa mecanizada.

Figura 25 – Sistema de tratamento preliminar composto por duas etapas de gradeamento manual e por uma peneira fina rotativa mecanizada



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista geral do sistema preliminar. (b) Gradeamento manual e resíduos retidos dispostos em laje perfurada para desaguamento. (c) Peneira fina rotativa mecanizada (ETE 18).

Na Figura 26, é possível verificar o mesmo tipo de sistema em uma ETE de médio porte, porém ainda em fase final de obra.

Figura 26 – Sistema de tratamento preliminar em fase final de obra composto por gradeamento manual, peneira fina rotativa mecanizada e grade fina



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista parcial dos canais de gradeamento. (b) Gradeamento médio seguido de peneira fina rotativa mecanizada no canal principal e gradeamento médio seguido de gradeamento fino manual no canal secundário, projetado para ser utilizado em casos de parada do canal principal, para realizar limpeza ou manutenção da peneira mecanizada.

O transporte dos resíduos retidos nos equipamentos de gradeamento e peneiramento mecanizado é realizado por meio de rosca ou esteira transportadora, encaminhando os resíduos para as caçambas de armazenamento temporário.

Na Figura 27 está exemplificado como são dispostas as caçambas e como a operação trabalha com o posicionamento e revezamento das caçambas de resíduos quando a ETE possui equipamento mecanizado. As caçambas possuem uma base com rodas sobre trilhos para que a caçamba cheia possa ser deslocada para posterior retirada, enquanto a caçamba vazia é posicionada manualmente para continuar recebendo os resíduos retidos no gradeamento, transportados por meio de esteira ou rosca transportadora até a caçamba. É importante que os equipamentos e demais materiais metálicos, incluindo os trilhos e a base móvel da caçamba, sejam resistentes ao ambiente corrosivo verificado na ETE.

Figura 27 – Detalhe das caçambas que armazenam os resíduos provenientes do gradeamento



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a)(b) Base sobre trilhos para revezar a posição entre caçamba cheia e vazia. (c) Vista lateral do equipamento de gradeamento, rosca transportadora e caçamba para armazenamento temporário dos resíduos retidos (ETE 17).

Quanto ao isolamento do sistema preliminar para inibir a emissão de odores, dentre as ETEs analisadas no Paraná, a maioria possui os canais de entrada, gradeamento e desarenadores tampados, com diferentes materiais como concreto, fibra de vidro ou outros materiais plásticos.

As tampas de concreto apresentam menor eficiência se comparada às demais, em termos de vedação e isolamento de odores, bem como menor praticidade operacional quando é necessário movimentar a tampa para realizar manutenção. É importante ressaltar que a eficácia das tampas está relacionada à solução de vedação e ao material utilizado para confecção das tampas, que deve ser resistente à corrosão provocada pelo  $H_2S$ , além de leve, para facilitar o manuseio em atividades de operação e manutenção.

A Figura 28 mostra exemplos de fechamento do canal de entrada, do gradeamento e do desarenador com tampas em concreto, fibra de vidro e outros materiais plásticos em diversas ETEs no Paraná.



Figura 28 – Fechamento do sistema de tratamento preliminar em diversas ETEs no Paraná



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Diferentes soluções para fechamento dos canais de gradeamento e desarenadores empregadas em diversas ETEs da Sanepar, incluindo tampas de concreto, fibra de vidro ou outros materiais.

As ETEs visitadas na Alemanha possuem sistema de tratamento preliminar composto por duas etapas de gradeamento, normalmente médio e fino, de 20 a 3 mm, de operação mecanizada, visando à retirada contínua de resíduos e à não obstrução das grades. Os equipamentos são fabricados em aço inox visando à proteção contra gases corrosivos.

Na Alemanha, é comum que o sistema preliminar esteja instalado em uma edificação ou um galpão fechado, com exaustão, captação e tratamento de odores, visando diminuir impactos negativos à vizinhança, relacionados à maus odores.

O uso de galpões também está relacionado à melhoria dos aspectos de operação e manutenção dos processos e à proteção do sistema, dos equipamentos e dos operadores que estariam sujeitos às variações e dificuldades provocadas pelas baixas temperaturas e pela neve no inverno.

Alguns exemplos de tratamento preliminar instalados em galpões fechados nas ETEs visitadas na Alemanha estão mostrados na Figura 29, na Figura 30, na Figura 31 e na Figura 32.

Figura 29 – Gradeamento e caçamba de resíduos sólidos instalados em galpão fechado



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista parcial interna do prédio que abriga o gradeamento e (b) detalhe da caçamba de plástico com tampa e com rodas para facilitar a movimentação da caçamba (ETE Neuhausen).

Figura 30 – Gradeamento e caçamba de resíduos sólidos instalados em galpão fechado

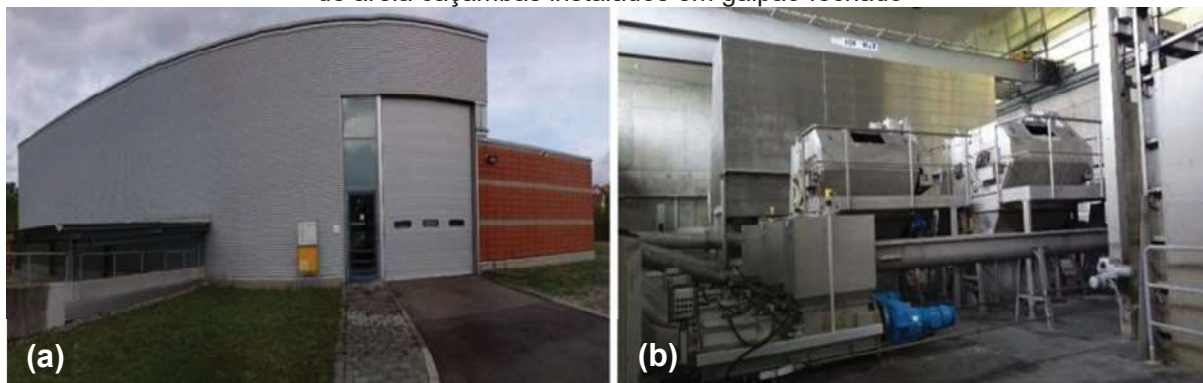


FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista interna do prédio que abriga o gradeamento. (b) Gradeamento mecanizado fechado em aço inox. (c) Caçambas de resíduos. (d) Detalhe das caçambas com rodas, facilitando a movimentação (ETE Kempten).



Figura 31 – Sistema de tratamento preliminar com gradeamento, desarenador, sistema de lavagem de areia caçambas instalados em galpão fechado



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista parcial externa do prédio que abriga o gradeamento. (b) Vista interna e gradeamento mecanizado fechado, sendo todos os equipamentos em aço inox (ETE Mühlhausen).

Figura 32 – Sistema de tratamento preliminar com gradeamento, desarenador, sistema de lavagem de areia caçambas instalados em galpão fechado



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista externa, com detalhe para a solução simplificada para abrigar o sistema preliminar. (b) Vista parcial interna do tratamento preliminar (ETE ISWA – Universität Stuttgart).

Os problemas relacionados a maus odores enfrentados atualmente pelas equipes de operação das ETES no Paraná, agravados quando há população vizinha à ETE, podem ser minimizados ou eliminados com soluções de equipamentos de gradeamento fechados, conforme mostrado na Figura 30 e na Figura 31, com cobertura dos canais de entrada e cobertura das caçambas de resíduos com tampas, como já é praticado em várias ETES no Paraná. Outra solução adicional é o isolamento de todos os processos de tratamento preliminar em um galpão fechado, desde que este possua sistema de exaustão, troca de ar periódica, e tratamento dos gases provenientes dessa etapa de tratamento, como verificado nas ETES visitadas na Alemanha.

Quanto à disposição dos resíduos, na Alemanha uma lei federal estabelece que apenas materiais inertes podem ser encaminhados a aterros, impedindo, portanto, que resíduos orgânicos sejam destinados a aterros. Assim, os resíduos sólidos retidos na etapa preliminar das ETEs são desaguados e destinados a uma planta de incineração e reaproveitamento energético, agregando sustentabilidade ao processo de tratamento dos subprodutos gerados em uma estação de tratamento de esgoto.

#### 4.4.1.2 Retenção de areia e gordura

No sistema de tratamento preliminar, as ETEs visitadas no Paraná dispõem de desarenador do tipo canal de escoamento horizontal, do tipo ciclônico, com ou sem *air lift*, ou do tipo quadrado com raspador de fundo, *Door Oliver*. Estas unidades de desarenação foram projetadas apenas para a retenção de areia, mas não da gordura, também presente no esgoto afluyente.

Já nas ETEs visitadas na Alemanha, a retenção de areia é realizada em uma caixa de areia aerada, onde, ao mesmo tempo, ocorre a sedimentação da areia e a flotação de gorduras, óleos e graxas. Todos os equipamentos para retenção de areia e gordura são de operação mecanizada. A areia retida e decantada no fundo do tanque é retirada por equipamentos mecânicos e conjuntos motobomba, desaguada e posteriormente lavada, objetivando o reaproveitamento da areia.

A água de desaguamento e de lavagem da areia retorna para o início do tratamento e a areia limpa é separada e utilizada na construção civil, principalmente como base para assentamento de tubulações ou base para pavimentação, por exemplo, agregando características sustentáveis ao processo.

Em algumas das ETEs visitadas na Alemanha, a estrutura e os equipamentos para retenção, desaguamento e lavagem da areia estão em galpão fechado, enquanto em outras ETEs o sistema funciona ao ar livre.

A Figura 33 mostra uma vista geral da ponte rolante e do raspador superficial para separar a gordura flotada na caixa de areia aerada, bem como um detalhe do sistema de pistão hidráulico do equipamento.

Nesse caso, o sistema não estava em galpão fechado para prevenir a dissipação de maus odores. Já em outras ETEs visitadas, a etapa de desarenação foi



instalada em local fechado, com sistema de captação e tratamento dos gases e sistema de troca de ar.

Figura 33 – Caixa de areia aerada com sistema de ponte rolante hidráulica



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista parcial da estrutura da caixa de areia aerada. (b) Detalhe do sistema hidráulico para deslocamento da ponte rolante com raspador superficial de gordura flotada (ETE *Kempton*).

Foi verificado que nos sistemas de ponte rolante operados nas ETEs visitadas na Alemanha eventualmente ocorrem problemas relacionados ao alinhamento e deslocamento longitudinal do equipamento. As duas extremidades da ponte são movidas por dois motores independentes e que precisam estar em perfeita sincronia. Caso os motores não estejam perfeitamente regulados, o deslocamento será diferente e a estrutura da ponte sofrerá torção seguida de travamento do sistema.

Este sistema de ponte rolante pode ser comparado aos sistemas utilizados nos tanques de flotação por ar dissolvido nas ETEs do Paraná e os problemas relatados nesse tipo de equipamento mecânico são os mesmos no Paraná e nas ETEs visitadas na Alemanha.

Para contornar as dificuldades verificadas, nas ETEs visitadas na Alemanha sempre há disponível equipamentos e peças para reposição, bem como ferramentas e mão de obra residente na ETE, sendo possível realizar reparos ou resolver com agilidade problemas de baixa ou até média complexidade. Apenas se o problema for de complexidade tal que a equipe de manutenção da ETE não consiga resolver, então é acionada a manutenção do fabricante. As equipes de operação relataram que o atendimento do fabricante pode demorar meses, assim como no Brasil, dependendo do problema e da peça ou do equipamento a ser reparado ou substituído.

Para este item, pode-se verificar que as dificuldades enfrentadas para os equipamentos mecânicos são semelhantes nos dois países, porém enquanto na

maioria das ETEs no Paraná atualmente não são verificadas mão de obra residente e peças ou equipamentos reserva disponíveis para resolver problemas em um curto espaço de tempo, na Alemanha as ETEs possuem equipamentos reserva, controle de vida útil e depreciação dos equipamentos, previsão de substituição dos equipamentos, e equipe local dedicada reparos e manutenção preventiva e corretiva.

As experiências internacionais de utilização de caixas de areia aeradas indicam bons resultados. Alguns estudos recentes realizados no Brasil contam com a participação de consultores alemães que estão indicando o uso da caixa de areia aerada visando à redução de gordura e, principalmente, à redução de formação de espuma nos reatores anaeróbios, considerando o uso predominante dos processos unitários anaeróbios no Brasil.

O emprego de caixas de areia aerada no Brasil ainda não é, entretanto, uma prática comum, sendo observadas tanto algumas experiências bem-sucedidas quanto outras problemáticas. Diferenças significativas como características do esgoto afluente, temperaturas médias anuais, entre outras variáveis, podem influenciar o funcionamento de caixas de areia aeradas e devem ser consideradas quando da concepção e da elaboração de projetos de caixas de areia aeradas. Para indicar e adotar esse processo como padrão para novos projetos de estações de tratamento de esgoto no Brasil, faz-se necessário realizar experimentos a fim de verificar as condições mínimas necessárias para garantir a flotação e retenção da gordura e o funcionamento do sistema.

#### 4.4.1.3 Decantadores primários

As estações de tratamento de esgoto municipais na Alemanha normalmente utilizam decantadores primários como primeira etapa de tratamento. Todas as ETEs visitadas na Alemanha possuem decantadores primários, sendo os demais processos variáveis conforme o porte da ETE e a qualidade do efluente final requerida.

Na Figura 34 estão apresentadas vistas parciais dos decantadores primários das ETEs visitadas no Sul da Alemanha.

Figura 34 – Decantadores primários nas ETEs visitadas no Sul da Alemanha



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) ETE *Kempton*. (b) ETE *Neuhausen*. (c) ETE *Sindelfingen*.

Na ETE que possui apenas decantadores primários, filtros percoladores e decantadores secundários, foi possível analisar os resultados de afluente e efluente de cada etapa de tratamento, verificando o número de amostras, a mediana e os valores mínimos e máximos para DQO, entre outros parâmetros.

A DQO mediana verificada no afluente foi igual a 470 mg/l, sendo o valor mínimo igual a 137 e o valor máximo, 807 mg/l, a partir de 106 amostras. A eficiência mediana para a remoção de DQO obtida nos decantadores primários foi igual a 41 %, confirmando o que sugere a literatura para uma ETE bem operada, conforme citado no item 2.5.1.3. A variação significativa da concentração afluente é devida às águas pluviais e de drenagem urbana, que também são encaminhadas às estações de tratamento de esgoto na Alemanha.

#### 4.4.1.4 Reatores anaeróbios

O Brasil possui um grande parque de reatores anaeróbios. No Paraná, cerca de 95 % das ETEs municipais relacionadas no presente estudo possuem tal processo. Considerando este cenário, os filtros percoladores devem ser projetados conforme as

características do efluente dos reatores anaeróbios, uma vez que esta é a realidade predominante.

Em todas as ETEs visitadas no Paraná, o processo unitário que antecede o filtro percolador é o reator anaeróbio, com variações quanto ao volume, à forma geométrica cilíndrica, tronco-cônica ou retangular, aos diferentes desenhos e configurações de fechamento e isolamento do reator para retenção de gases, e às soluções para retirada de espuma e de lodo, porém todos utilizando do mesmo princípio de atividade anaeróbia com manto de lodo.

Dentre as ETEs analisadas, para aquelas que realizam análise de DBO ou DQO do efluente do reator anaeróbio, foi possível estimar a eficiência dessa etapa de tratamento em termos de DBO e DQO.

Em 7 ETEs, a eficiência variou de 68 a 85 % em termos de DBO, sendo esse resultado obtido a partir da mediana de 263 amostras. Em outras 11 ETEs, a eficiência variou de 56 a 76 % em termos de DQO, a partir da mediana de 434 amostras. Tais eficiência médias obtidas vão ao encontro do que sugere a literatura quanto à eficiência de reatores anaeróbios, conforme citado no item 2.5.1.4.

A retirada de espuma do reator é importante para que gorduras e outros sólidos não cheguem ao filtro. A presença desses materiais no afluente ao filtro causa problemas de entupimento do sistema de distribuição, comprometendo a distribuição do afluente e, da mesma forma, prejudicando o meio suporte e provocando a colmatação do filtro, reduzindo a eficiência do processo de tratamento.

Os projetos devem oferecer soluções para retirada de espuma para toda a área superficial, a fim de evitar que esse material seja perdido no efluente do reator e prejudique o filtro percolador.

Na Figura 35 está exemplificada uma situação comum de um reator anaeróbio com laje e com acessos apenas por meio de tampas quadradas de 50x50 cm ou tampas circulares equivalentes às tampas de poços de visita, que não permitem que o operador alcance toda a espuma formada, seja com retirada manual com rastelos, ou com mangote de caminhão de sucção. Verifica-se ainda poucos pontos de acesso, impedindo a retirada de espuma em toda a superfície.

Figura 35 – Pontos de acesso para coleta de espuma nos reatores anaeróbios



FONTE: Arquivo da Sanepar (2017).

**Nota:** O número de aberturas na laje não permite acesso para retirada adequada da espuma formada no reator anaeróbio (ETE 20).

As condições e a periodicidade do descarte de lodo também são fundamentais para que o efluente do reator não carregue sólidos para o filtro. A falta de descarte de lodo do reator faz com que o manto de lodo fique demasiadamente espesso e alto e faz com que sejam carregadas as partículas, aumentando a concentração de sólidos no efluente do reator.

Para permitir a análise e a determinação da periodicidade de descarte de lodo, o projeto precisa prever pontos de coleta de lodo em diferentes alturas do reator e indicar a periodicidade de descarte, a ser confirmada operacionalmente. As saídas para descarte do lodo devem estar posicionadas de tal forma a provocar um descarte homogêneo dentro do reator.

A operação, por sua vez, deve identificar a periodicidade ideal de descarte para que a concentração de sólidos não aumente no efluente, estabelecendo a rotina a ser realizada conforme as peculiaridades de cada ETE.

Para todo o processo de descarte da fase sólida, é fundamental que a ETE possua estrutura suficiente para processar o lodo descartado, seja com leitos de secagem ou com desaguamento mecanizado. Para isso, o projeto deve prever com precisão a quantidade de lodo produzido e dimensionar adequadamente o sistema de desaguamento, enquanto a operação deve obedecer a periodicidade ideal definida, seja em projeto ou a partir da observação do comportamento do reator em uso e definição de uma rotina conforme as peculiaridades da ETE.

Em algumas ETES visitadas no Paraná foi percebido que problemas relacionados à capacidade e à estrutura disponível para secagem de lodo comprometeram a execução de uma rotina ideal de descarte de lodo, refletindo no



acúmulo de lodo nos reatores e no consequente arraste de lodo para os filtros percoladores a jusante, acelerando processos de colmatção do meio suporte e prejudicando o funcionamento dos filtros e a eficiência dessas ETEs.

Problemas relacionados à corrosão do sistema de distribuição do filtro e problemas de odores no filtro percolador são decorrentes do tratamento anaeróbio e do efluente do reator anaeróbio, conforme discussões apresentadas nos itens 4.4.2.6 e 4.4.2.23. Recomenda-se que o efluente do tratamento anaeróbio deve passar por uma etapa a montante do filtro capaz de promover o desprendimento, a captação e o tratamento dos gases corrosivos e odoríferos oriundos do tratamento anaeróbio que ocorre no reator.

As observações realizadas a partir das experiências nas ETEs do Paraná confirmam que o funcionamento de um filtro percolador depende diretamente das condições de operação e manutenção do reator anaeróbio e das características do efluente do reator anaeróbio. O projeto, a implantação e a operação de uma ETE com filtros percoladores devem considerar, portanto, a operação adequada dos reatores anaeróbios como fator fundamental para o bom funcionamento dos filtros.

#### 4.4.2 Filtros percoladores

Os subitens a seguir descrevem e discutem cada aspecto teórico e prático estudado e observado nas ETEs visitadas no Paraná e no Sul da Alemanha diretamente relacionados aos filtros percoladores. Os detalhes verificados nas ETEs visitadas são utilizados para exemplificar e ilustrar as discussões apresentadas para cada aspecto observado.

Ressalta-se que os subitens a seguir não enfatizam a descrição completa de cada ETE, mas sim se utilizam do que foi verificado ao longo das visitas para exemplificar o que consta em literatura e em outros estudos quanto aos aspectos relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, incluindo (1) materiais utilizados como meio suporte, (2) dificuldades de obra relacionadas ao meio suporte, (3) custo real para aquisição de meio suporte, (4) fatores adicionais para comparar custo entre diferentes materiais para meio suporte, (5) problemas operacionais relacionados ao meio suporte, (6) sistema de distribuição de vazão do filtro percolador, (7) a influência de materiais sólidos no sistema de distribuição e a importância da manutenção preventiva,

(8) uniformidade da distribuição da vazão afluyente, (9) manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição, (10) consequências da distribuição não uniforme, (11) outras variações de sistema de distribuição afluyente, (12) taxas de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica e (13) necessidade de verificação das faixas sugeridas em literatura, (14) crescimento e controle do biofilme, (15) lavagem do meio suporte, (16) colmatção e substituição do meio suporte, (17) eficiência de molhamento, (18) aeração natural e arraste de ar, (19) recirculação do efluente dos filtros percoladores, (20) recirculação de lodo, (21) nitrificação e desnitrificação, (22) sistema de controle de picos de vazão afluyente, (23) odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbico e (24) crescimento de moscas, insetos, vetores e caramujos no meio suporte dos filtros percoladores.

#### 4.4.2.1 Materiais utilizados como meio suporte

Dentre as ETEs analisadas e visitadas no Paraná, 23 possuem filtros percoladores com meio suporte em pedra brita e as outras 4 possuem meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado.

Das 4 ETEs que possuem meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado, em 3 o plástico foi implantado em substituição à pedra brita, por questões de colmatção do meio suporte e para melhorar a qualidade do efluente final.

Na Figura 36, na Figura 37 e na Figura 38 estão representados filtros percoladores com meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado no Paraná.

Figura 36 – Filtro percolador com meio suporte em pedra brita



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Operação da ETE em fase inicial (ETE 17).



Figura 37 – Filtro percolador com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Operação da ETE após a troca do meio suporte em fase inicial (ETE 16).

Figura 38 – Filtro percolador com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** ETE em fase final de obra (ETE 24).

Dentre as 3 ETEs visitadas na Alemanha, a de menor porte possui filtros percoladores com meio suporte em pedra lava. Na Figura 39 é possível visualizar uma vista parcial da superfície do filtro e um detalhe do biofilme aderido ao meio suporte.

Figura 39 – Vista parcial da superfície do filtro percolador e detalhe do biofilme aderido ao meio suporte em pedra lava

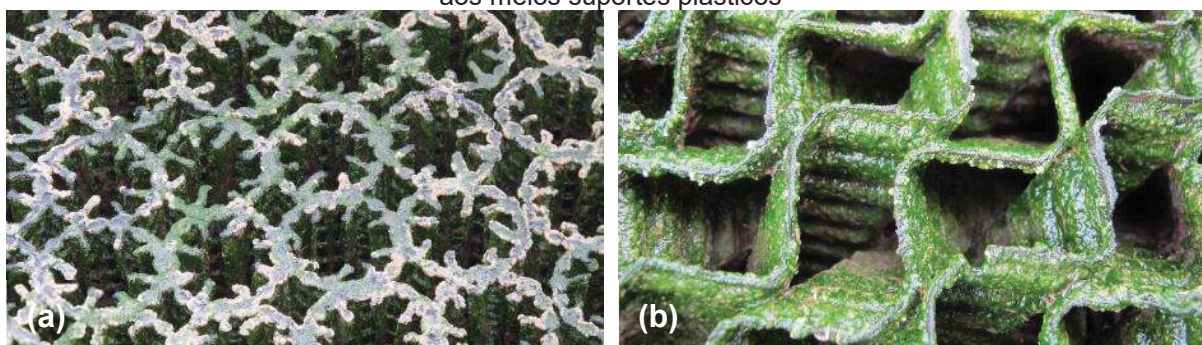


FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Superfície do filtro e braço distribuidor da vazão afluente. (b) Detalhe do biofilme aderido ao meio suporte em pedra lava (ETE Neuhausen).

As outras duas estações visitadas na Alemanha, de médio e grande porte, possuíam filtros com pedra lava, sendo recentemente substituídas por meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, em função da colmatação e da necessidade de tornar o processo mais eficiente. Enquanto uma das ETEs substituiu o meio suporte em todos os filtros, a outra manteve alguns filtros com pedra lava, outros com plástico estruturado de fluxo cruzado e, ainda, um filtro utilizado para pesquisas acadêmicas e operacionais, também em escala operacional, com quatro tipos diferentes de meio suporte plástico estruturado. Na Figura 40 estão apresentados detalhes do biofilme aderido em diferentes tipos de meio suporte plástico do filtro utilizado para pesquisa.

Figura 40 – Vista parcial da superfície de um dos filtros percoladores e detalhes do biofilme aderido aos meios suportes plásticos



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Plástico tipo tubo colmeia. (b) Plástico estruturado de fluxo cruzado (ETE *Sindelfingen*).

A literatura recomenda a utilização de pedra brita para filtros percoladores operados em regime de baixa taxa, ou seja, filtros que objetivam à nitrificação. Para filtros operados em regime de alta taxa, a literatura indica que ambos materiais podem ser adequados, porém sugere vantagens quando se utiliza meio suporte plástico e atenta para a importância da retenção de sólidos quando o meio suporte não apresenta elevado índice de vazios.

Para filtros operando em alta taxa, a literatura sugere faixas de valores para pedra brita e para plástico. Para filtros operando em baixa taxa, no entanto, a literatura sugere apenas faixas de valores para pedra brita, não sendo especificado para meio suporte plástico valores de operação em baixa taxa, ou seja, equivalente a um filtro capaz de realizar nitrificação.

A indicação para utilização de pedra brita em filtros de baixa taxa e a ausência de valores para operação de filtros com meio suporte plástico em baixa taxa é devida à reduzida eficiência de molhamento obtida quando se distribui a vazão em regime de

baixa taxa de aplicação hidráulica em um meio suporte plástico, que oferece elevada área superficial específica. A operação de um filtro percolador com um material plástico de elevada área superficial específica em regime de baixa taxa hidráulica resulta em uma situação de subaproveitamento da área superficial específica e no desenvolvimento do biofilme aquém do esperado, pois a vazão não é suficiente para molhar toda a área superficial específica disponível para o crescimento do biofilme.

Por oferecerem maior área superficial específica, os materiais plásticos adotados suportam uma taxa de aplicação hidráulica superior à adotada para meio suporte em pedra. Para a mesma qualidade final do efluente, adotando o meio suporte plástico, o volume do filtro pode ser reduzido ou, por outro lado, mantendo o mesmo volume, a qualidade do efluente final deve aumentar em função do acréscimo de área superficial específica disponível para o desenvolvimento do biofilme, desde que aplicada uma taxa hidráulica compatível com o material plástico.

O fato de a literatura não atribuir valores para operação em baixa taxa pode ser justificado considerando, portanto, que o meio suporte plástico é utilizado principalmente para permitir a aplicação de taxas hidráulicas mais altas, não fazendo sentido aplicar baixas taxas hidráulicas em filtros com meio suporte plástico.

Além da maior área superficial específica, o plástico estruturado, por ser autoportante, mais leve e com elevado índice de vazios, apresenta maior capacidade de empilhamento, permitindo a concepção de filtros de maiores profundidades. A somatória desses aspectos converge para um filtro que, mesmo praticando elevadas taxas de aplicação hidráulica, obtém elevada eficiência quanto à remoção de matéria orgânica e promove a nitrificação.

Pode-se sugerir, então, a classificação de filtros percoladores em função do objetivo do filtro e não em função apenas da taxa de aplicação hidráulica, desvinculando, assim, o conceito de “baixa taxa” à capacidade de realizar nitrificação.

Estudos dedicados à verificação de faixas de valores de taxa de aplicação hidráulica e de carga orgânica volumétrica para filtros percoladores com meio suporte plástico podem ser realizados para que a maior área superficial específica oferecida pelo material plástico seja de fato melhor aproveitada. As discussões sobre o desenvolvimento do biofilme e sobre a eficiência de molhamento do meio suporte são apresentadas nos itens 4.4.2.14 e 4.4.2.17.

Quanto à escolha do meio suporte, o volume do filtro e as cargas estruturais exercidas sobre o filtro serão variáveis conforme o material utilizado, assim como os



materiais construtivos e os métodos de construção também poderão ser otimizados, conforme o meio suporte e o dimensionamento calculado.

Para utilizar meio suporte plástico estruturado, deve-se atentar ainda para a resistência oferecida pelo material. Para garantir que as camadas mais inferiores suportem a massa específica do meio suporte somada à do biofilme aderido, as peças de plástico devem ser fabricadas com plástico de densidade apropriada para que não ocorram deformações permanentes em função dos esforços pontuais e distribuídos que serão aplicados. As camadas mais superiores poderão ser especificadas com plástico de menor densidade, uma vez que está submetida a menos esforços se comparada às camadas mais inferiores do meio suporte, visando redução de custos. Ainda assim, o material deve ter resistência suficiente para que seja possível caminhar sobre o meio suporte sem danificar a superfície.

Na Figura 41 está apresentado um material plástico estruturado de fluxo cruzado com pouca resistência a cargas pontuais, danificado ao longo do tempo.

Figura 41 – Meio suporte plástico estruturado danificado ao longo do tempo



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** Material plástico de baixa densidade e baixa resistência (ETE Sindelfingen).

A escolha do meio suporte influencia o dimensionamento hidráulico e estrutural do filtro, o cálculo de perda de carga do sistema e a eficiência do filtro percolador, sendo fundamental ponderar todos os aspectos e variáveis inerentes à escolha do material a ser utilizado como meio suporte ainda em etapa de concepção do projeto. A alteração do meio suporte em outras fases como detalhamento do projeto, implantação ou operação implicam em revisão do dimensionamento do filtro, dos cálculos de perda de carga do sistema, dos projetos hidráulico, estrutural e geotécnico, do *layout* da ETE, entre outros fatores. Ainda assim, as alterações podem resultar em adaptações que nem sempre oferecerão as condições ideais de operação.

Algumas experiências adicionais sobre o uso da pedra brita e do plástico estão relatadas nos próximos itens, complementando as discussões sobre os materiais utilizados como meio suporte com relatos de experiências de obras em diferentes regiões do Paraná, incluindo dificuldades quanto ao fornecimento de pedra brita adequada, no item 4.4.2.2; comparação de custos entre a pedra brita e o plástico estruturado, no item 4.4.2.3; fatores que devem ser considerados em um estudo de comparação entre os materiais, no item 4.4.2.4; e outros problemas relacionados ao meio suporte e os reflexos na operação e na manutenção, no item 4.4.2.5.

#### 4.4.2.2 Dificuldades de obra quanto ao fornecimento de pedra brita adequada

Ao buscar experiências adicionais para aspectos relacionados à etapa de implantação de filtros percoladores nas ETEs no Paraná, foi possível levantar dificuldades e problemas enfrentados em algumas regiões que mais recentemente executaram obras de filtros. Foi verificado que em diferentes regiões do Estado há dificuldade em encontrar pedreiras que forneçam pedra brita respeitando a faixa granulométrica especificada. Além da granulometria fora do padrão recomendado pelas normas e diferente das especificações de projeto, há problemas em relação à qualidade da brita, que não pode ser de material sedimentar. Por fim, há problemas quanto à presença significativa de pó de pedra.

Nem todos os fornecedores possuem peneira para selecionar brita na granulometria recomendada. Mesmo nas poucas pedreiras que trabalham com peneira para selecionar a brita 4A, o material selecionado é entregue com porções de granulometria inferior à faixa e com quantidades relevantes de pó de pedra, representando problemas futuros para o filtro percolador, principalmente quanto à colmatação do meio suporte.

Nas unidades de obras das regionais de Curitiba, do Nordeste e do Sudoeste do Estado, foi relatada a dificuldade de encontrar fornecedor com material adequado. Nas obras mais recentes, a seleção da pedreira para fornecer pedra brita foi criteriosa e foi preciso buscar material em outros municípios, mesmo tendo disponível fornecedores mais próximos, já que estes não atendiam às especificações mínimas necessárias.

Quando a pesquisa de qualidade do material dos prováveis fornecedores não é realizada em etapa de projeto e de orçamento de obra, ou a empreiteira absorve os

custos não previstos e reduz o lucro esperado em relação àquele serviço ou passa a exigir do contratante aditivos de preço, justificando a dificuldade em se obter o material da qualidade desejada utilizando o deslocamento previsto em orçamento.

A fiscalização de obra deficitária pode implicar em retrabalhos em relação à retirada e separação manual, lavagem e recolocação do material no filtro, impactando no preço unitário do meio suporte e no orçamento da obra. Caso não sejam realizadas ações corretivas em etapa de obra, as dificuldades serão sentidas pela operação do sistema.

A partir de um caso relatado pela unidade de obras da regional de Curitiba, foi possível estimar o custo real da pedra brita quando o material oferecido não atende plenamente as características necessárias para o bom funcionamento de um filtro percolador. Com os valores de obra orçados e com a estimativa de custo real para implantação, foi possível apontar uma comparação de custo real para aquisição de pedra brita e de plástico estruturado. Os valores e a comparação de custos estão apresentados a seguir, no item 4.4.2.3.

#### 4.4.2.3 Custo real para aquisição e instalação de meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado a partir de uma experiência de obra

Dificuldades relacionadas ao fornecimento de material britado na granulometria adequada foram vivenciadas em algumas obras de estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores.

Em uma obra recentemente realizada na região metropolitana de Curitiba, a pedra brita fornecida não estava adequada ao padrão especificado, gerando atividades e mão de obra adicionais, bem como demandando aquisição de volume complementar de pedra brita para substituir aquelas que não estavam de acordo com a granulometria especificada.

A partir dessa experiência de obra, foi possível verificar o custo adicional para adequação do meio suporte em pedra brita, somando o custo inicialmente previsto e os custos adicionais necessários para separação, lavagem e complementação do material visando atender a granulometria especificada.

Quando da contratação da obra, a pedra brita 4A foi orçada em 111,37 R\$/m<sup>3</sup>. O material foi entregue, porém não estava adequado quanto à granulometria. Havia material fora da faixa granulométrica recomendada por norma e especificada em

projeto, além da presença significativa de pó de pedra, o que demandou lavagem e separação manual do material já entregue em canteiro de obra. Estes serviços adicionais implicaram em um incremento de custo na obra, composto por homem hora e por hora de máquina alugada.

Para realizar a separação manual e a lavagem da pedra, bem como para remover e recolocar as pedras no filtro, a empreiteira utilizou 5,53 vezes mais homem hora de servente e 1,85 vezes mais hora de retroescavadeira, resultando em valores adicionais ao custo de aquisição da brita iguais a 96,61 R\$/m<sup>3</sup>, referente à homem hora, e 77,30 R\$/m<sup>3</sup>, referente à locação de maquinário.

Ao valor de 111,37 R\$/m<sup>3</sup>, inicialmente orçado, foi adicionado, então, 96,61 R\$/m<sup>3</sup> e 77,30 R\$/m<sup>3</sup>, resultando em uma soma parcial de 285,28 R\$/m<sup>3</sup>.

Para estimar o custo real da brita selecionada, foi necessário considerar ainda o volume adicional adquirido para substituir o volume de brita rejeitado. A unidade de obras estimou que, para aquele caso, o volume rejeitado poderia variar de 20 a 60 % do volume inicialmente adquirido. Estimando que o volume rejeitado fosse próximo a 20 %, o custo real da brita seria de 342,34 R\$/m<sup>3</sup>. Supondo que, em outros casos, o volume rejeitado pudesse chegar a 60 % do volume total, o custo real da pedra brita poderia chegar a 456,45 R\$/m<sup>3</sup>.

Considerando apenas estes fatores relacionados à obra, custos de aquisição do material, mão de obra e máquinas para adequação do material, o orçamento da pedra brita na faixa granulométrica especificada passou de 111,37 R\$/m<sup>3</sup>, iniciais, para estimados 342,34 R\$/m<sup>3</sup>, ou até 456,45 R\$/m<sup>3</sup>.

Ainda assim, mesmo com investimentos adicionais para adequar as características da brita, não há garantia de granulometria ideal em todo o volume do meio suporte, considerando que o trabalho de seleção foi manual e considerando que ainda poderia haver pó de pedra no material selecionado, em função do atrito que ocorre durante o transporte e o descarregamento para acomodação das pedras dentro dos filtros.

A estimativa do custo real da pedra brita para este caso de obra supracitado traz à discussão a comparação entre o valor da pedra brita e do plástico estruturado. A partir da experiência da obra citada e do valor real da pedra brita para aquele caso, e com uma estimativa de custo para o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, foi possível comparar valores entre tais materiais.



O custo do material plástico estruturado de fluxo cruzado na época da referida obra era de cerca de 700,00 R\$/m<sup>3</sup>. O valor orçado em 2017 do material entregue e instalado na região de Curitiba foi de 700,00 a 1.100,00 R\$/m<sup>3</sup>, considerando um material que atende requisitos de resistência mecânica. Este valor foi repassado por um representante de um fornecedor alemão, cuja fábrica foi visitada pela autora do estudo, considerando a cotação do Euro igual a R\$ 3,90.

O valor de aquisição do meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado pode variar dependendo da densidade requerida para o material, que, por sua vez, varia em função da altura do filtro. Para filtros de maiores profundidades, o fornecedor orienta que as camadas mais inferiores requerem maior resistência estrutural, uma vez que devem suportar o peso próprio do meio suporte somado ao do biofilme aderido, conforme já comentado nas discussões do presente estudo, sendo necessário adotar plástico de maior densidade na fabricação das camadas mais inferiores do filtro.

O valor orçado pelo fornecedor também pode variar dependendo do volume a ser adquirido, pois normalmente há o fator de economia de escala. Para volumes maiores, o valor por volume tende a diminuir em função da logística necessária, desde a produção do lote até o transporte, a montagem e a instalação do material.

#### 4.4.2.4 Fatores adicionais que devem ser considerados para comparar o custo de implantação de um filtro com pedra brita ou com plástico estruturado

Além dos custos de aquisição da pedra brita e do plástico, apresentados no item anterior, uma análise comparativa completa de *Capex* e *Opex* para definir qual meio suporte é mais adequado a cada projeto deve considerar outras diferenças significativas, vantagens e desvantagens relacionadas à utilização de pedra brita ou plástico estruturado como meio suporte.

Como o plástico estruturado oferece uma área superficial específica maior, há redução de volume útil do meio suporte, implicando em unidades de tratamento mais compactas, refletindo em redução de custos da obra civil.

Adicionalmente, por ser um material leve e ter como característica índice de vazios superior a 97 %, o plástico estruturado exerce menos carga sobre a estrutura do filtro, permitindo que toda a estrutura seja mais esbelta, incluindo fundação, laje de fundo e paredes laterais, refletindo positivamente no valor da obra civil.

A utilização da pedra brita demanda a construção de uma laje de drenagem perfurada, como exemplificado na Figura 42 e na Figura 43. Dentre os projetos verificados, a espessura dessa laje de concreto é de 15 a 30 cm.

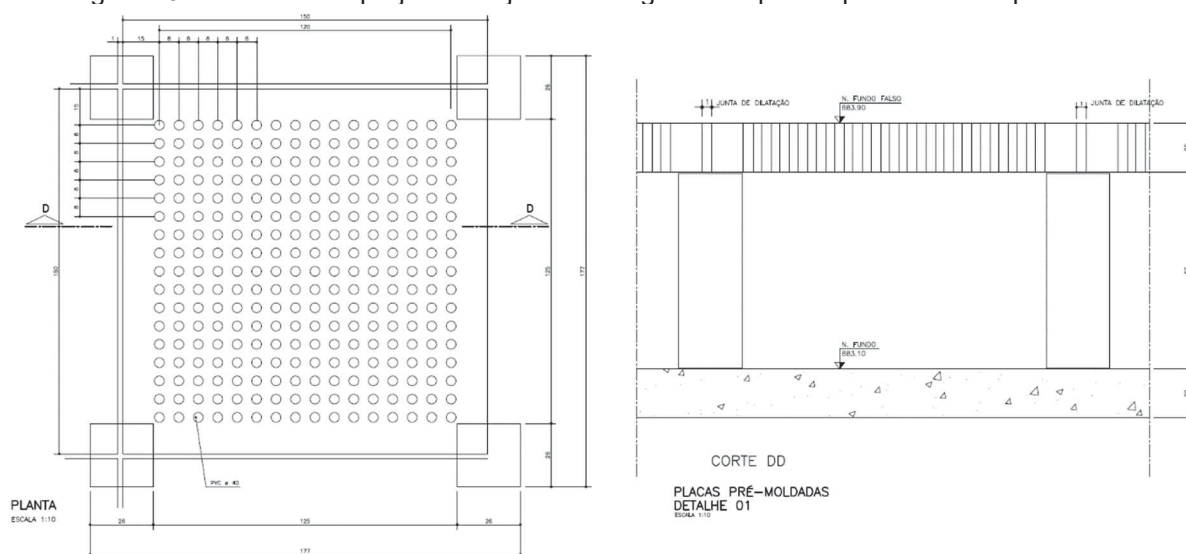
Figura 42 – Meio suporte em pedra brita exige laje de drenagem com função estrutural



FONTE: Arquivo da empresa Enexio GmbH (2015).

**Nota:** Laje de drenagem perfurada (sem o meio suporte) e eixo do sistema de distribuição afluente.

Figura 43 – Detalhes de projeto da laje de drenagem com placas pré-moldadas perfuradas



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2015).

As placas perfuradas podem representar problemas futuros relacionados à colmatação e entupimento, bem como relacionados à aeração natural do filtro. Caso os furos não obedeçam às recomendações de norma e às especificações de projeto, a obstrução dos furos pode resultar em um fluxo hidráulico inadequado, formação de zonas mortas, entupimento dos furos, colmatação do meio suporte, geração de zonas anaeróbias e geração de maus odores, bem como pode prejudicar o fluxo de ar e a aeração natural do filtro, comprometendo a atuação da biomassa aeróbia e gerando

também zonas anaeróbias e maus odores. O projeto deve atentar para que os furos sejam de diâmetro adequado para evitar obstruções e entupimentos e para que a quantidade de furos resulte na proporção mínima de área aberta para promover o fluxo de ar necessário para a manutenção do ambiente aeróbio conforme parâmetros mínimos estabelecidos em literatura e em norma.

Já a utilização de meio suporte plástico estruturado permite que as peças ou blocos de plástico estruturado sejam simplesmente apoiados em vigas e pilares ou em blocos de concreto pré-moldado, como mostrado na Figura 44, dispensando a laje de drenagem perfurada e representando mais economia de obra. A eliminação da laje perfurada pode resultar ainda em menos problemas resultantes do acúmulo de sólidos no fundo falso do filtro, bem como maior fluxo de ar no interior do filtro percolador.

Também por ser estruturado e autoportante, o plástico não demanda paredes com estrutura resistente às cargas e esforços laterais exercidos pelo meio suporte, como ocorre nas paredes de um filtro com pedra, apenas sendo necessário o fechamento lateral do filtro com uma parede simples, de alvenaria ou outra solução pré-fabricada, sem função estrutural, como mostrado na Figura 44 e na Figura 45.

Figura 44 – Meio suporte plástico apoiado em blocos de concreto, dispensa o uso de laje perfurada



FONTE: Arquivo da empresa *Enexio GmbH* (2015).

Figura 45 – Paredes laterais em material pré-fabricado e leve (painéis de aço, PRFV ou outros)



FONTE: Arquivo da empresa *Enexio GmbH* (2015).

Estas variações sugerem, portanto, economia do volume do material utilizado como meio suporte e economia na obra civil, implantando soluções construtivas mais simples e de menor custo, impactando positivamente o valor total da obra.

Prever e orçar detalhadamente as variações apresentadas e discutidas no presente estudo é fundamental para a composição de um estudo completo de *Capex* e *Opex* quando se deseja verificar qual material a ser utilizado como meio suporte apresenta mais vantagens para o projeto e a obra em análise.

Quando a área do terreno onde será implantada a ETE é um fator limitante, o material plástico representa redução da área necessária para implantação do filtro, sendo o valor da área a ser adquirida também um fator a ser analisado.

Por fim, a análise comparativa deve considerar também as vantagens quanto às atividades operacionais e de manutenção e os custos relacionados, bem como deve considerar a segurança que cada material oferece em relação à durabilidade, estabilidade de funcionamento, operação, manutenção e controle da eficiência do processo unitário e da ETE.

#### 4.4.2.5 Problemas com o meio suporte e os reflexos na operação

Eventuais dificuldades e problemas não considerados em etapa de concepção e projeto, ou não identificados e corrigidos em fase de obra, como os relatados ao longo do presente estudo, serão sentidos pela operação e poderão comprometer o atendimento aos padrões de lançamento.

A principal dificuldade em solucionar problemas quando a ETE já está em operação é a paralisação do processo para executar as melhorias necessárias, como recuperação ou substituição do meio suporte colmatado, por exemplo.

Quando a ETE possui duas ou mais unidades em paralelo, pode-se parar a operação de uma unidade para manutenção, implicando em sobrecarga nas outras unidades em operação, comprometendo a eficiência do processo por um período de tempo. Em função da desestabilização das atividades biológicas normais, deve-se prever um período de pré-operação para a estabilização biológica. Por esse motivo, o funcionamento do tratamento biológico não será obtido logo após a execução da obra ou da melhoria, mas sim após um período mais prolongado que inclui a recomposição e readaptação dos micro-organismos.

Por outro lado, quando não há unidades em paralelo, situação comum em ETEs de pequeno porte, a parada implicaria em lançar o efluente fora do padrão de qualidade desejado, caracterizando um passivo ambiental. Situações como essa podem ser contornadas procurando sempre dimensionar a ETE para que sejam operados pelo menos dois filtros em paralelo, possibilitando a parada de um filtro e a operação do outro com taxas hidráulicas e cargas orgânicas volumétricas superiores, porém por tempo determinado. Para casos específicos, pode-se verificar a viabilidade para implantar uma unidade modular provisória para suprir a ETE enquanto são feitos os reparos necessários.

#### 4.4.2.6 Sistema de distribuição da vazão afluyente ao filtro percolador

Quanto ao sistema de distribuição do afluyente, foram verificadas questões relacionadas ao material de fabricação dos componentes, às soluções para distribuir o afluyente e às soluções para manter a distribuição uniforme em toda a área superficial do filtro. Foram verificadas também as práticas e rotinas de manutenção preventiva e de limpeza do sistema, entre outros fatos específicos observados.

Quanto ao material empregado, foram verificados sistemas fabricados em poliéster reforçado com fibra de vidro (PRFV), policloreto de vinila clorado (CPVC), aço galvanizado, e aço inox AISI 304 e 316.

Em uma das ETEs analisadas no Paraná, o sistema de distribuição em PRFV sofreu corrosão, provocada pela ação do  $H_2S$  proveniente do tratamento anaeróbio a montante, dissipado no cascadeamento provocado na distribuição do afluyente ao filtro. A utilização de um material não resistente à corrosão, a vazão e velocidade de rotação variáveis e o fato de que a força hidráulica era insuficiente para provocar a rotação do sistema de distribuição resultou em um cenário em que o sistema parou de rotacionar e passou a aplicar a vazão afluyente apenas em uma área restrita logo abaixo dos braços, inutilizando praticamente todo o volume de meio suporte e comprometendo a eficiência esperada para a ETE.

Na Figura 46, é possível identificar os braços de PRFV desnivelados e deformados e as faixas mais escuras de pedra brita molhada, logo abaixo dos braços.



Figura 46 – Sistema de distribuição parado, braços distribuidores em PRFV desnivelados e deformados e meio suporte subutilizado



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2016).

**Notas:** (a) Vista do filtro percolador e do sistema de distribuição deformado e totalmente parado. (b) Detalhe do eixo do sistema de distribuição, dos braços deformados e da diferença entre a superfície da brita molhada e seca (ETE 23).

Em outra ETE analisada no Paraná, foi relatada experiência de corrosão de um sistema de distribuição em aço inox AISI 304 que operava há apenas cerca de dois anos. O aço inox AISI 304 oferece menor resistência à corrosão se comparado ao aço inox AISI 304L, aço inox AISI 316 e 316L. A Figura 47 mostra os sinais de corrosão no braço distribuidor e um vazamento na geratriz superior do tubo.

Figura 47 – Sistema de distribuição em aço inox AISI 304 com sinais de corrosão e vazamento



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Corrosão superficial e total, já apresentando pontos de vazamento na geratriz superior da tubulação, próximo ao eixo do sistema (ETE 16).

O emprego de materiais mais leves e resistentes à corrosão deve ser definido para todos os componentes do sistema de rotação. A corrosão do sistema compromete a rotação e, conseqüentemente, a distribuição uniforme do afluente na superfície do filtro.

A partir dessas experiências, atualmente, a especificação básica para o sistema de distribuição deve definir a classificação mais adequada para o aço inox, visando à resistência à corrosão.

Para cada projeto, deve-se estudar a viabilidade em utilizar um ou outro material, levando em consideração o valor para aquisição, o adequado funcionamento, a resistência à corrosão, a rotina de operação e manutenção preventiva e a vida útil do equipamento.

Para diferenciar as configurações de aço inox resistentes à corrosão, de forma simplificada, o aço inox AISI 304<sub>L</sub> é mais resistente à corrosão se comparado ao aço inox AISI 304. A principal diferença entre o aço inox 304 e 304<sub>L</sub> é a quantidade de carbono na liga metálica, sendo o 304<sub>L</sub> com menos carbono. A diferença entre o aço inox 316 e 316<sub>L</sub> segue a mesma lógica.

Ao ser submetido a temperaturas entre 425 e 800 °C, a liga de aço menos resistente à corrosão é a que possui mais carbono na sua composição. Assim, quanto menor a proporção de carbono no aço, mais resistente à corrosão ele se apresenta.

Já a diferença entre os aços da linha 304 e 316, incluindo 304<sub>L</sub> e 316<sub>L</sub>, é a utilização de molibdênio na linha 316, agregando maior resistência à corrosão.

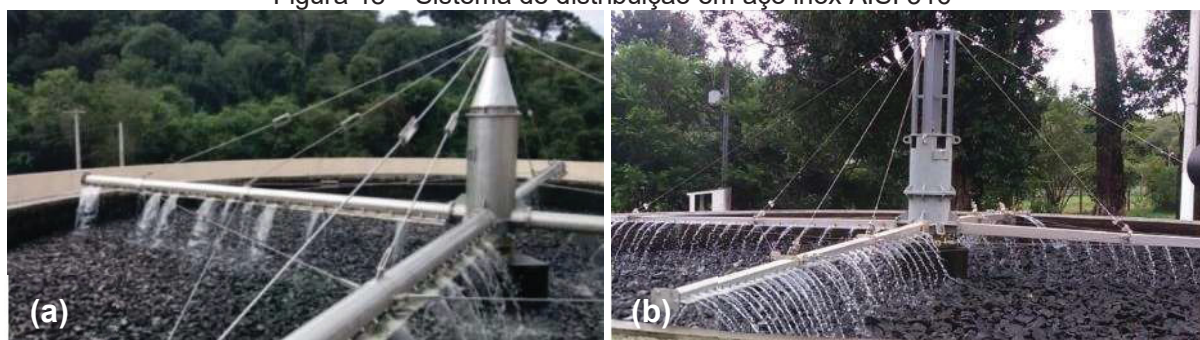
Manuais técnicos de fornecedores de tubulação em aço inox recomendam cuidado até mesmo com o transporte das peças, alertando que choques mecânicos ou atritos podem danificar a peça e comprometer a proteção contra a corrosão. Assim, perfurações ou cortes posteriores podem, da mesma forma, comprometer a resistência à corrosão das peças componentes.

A especificação deve exigir que os tubos não sejam expostos a altas temperaturas ou sofram processos de perfurações, cortes ou soldas posteriores à entrega do fornecedor; e que todas as peças do sistema de distribuição, incluindo braços, tirantes, elementos periféricos, peças auxiliares ou complementares, devem ser fornecidas com a mesma resistência à corrosão.

Na Figura 48 estão apresentados dois sistemas de distribuição em aço inox AISI 316, sendo um com braços de seção circular e outro com seção retangular, ambas em operação no Paraná.



Figura 48 – Sistema de distribuição em aço inox AISI 316



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Braços de seção circular (ETE 17) e (b) de seção retangular (ETE 05).

De forma alternativa, foi verificado um sistema de distribuição em CPVC, implantado em substituição a um equipamento antigo que sofreu corrosão, que tem se mostrado resistente e preservado, conforme observado na Figura 49. Ressalta-se que a ETE apresentada na Figura 49 possui um sistema de aeração forçada na caixa divisora de fluxo afluente aos filtros percoladores para desprendimento de  $H_2S$ , seguido de um sistema de captação e tratamento do  $H_2S$  desprendido, tornando o afluente ao filtro menos agressivo quanto à corrosão, preservando o sistema de distribuição. Os detalhes do sistema de controle de gases corrosivos e odores estão apresentados no item 4.4.2.23.

Figura 49 – Sistema de distribuição em CPVC



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Não há sinais de corrosão ou outros problemas relacionados ao material CPVC (ETE 05).

Quanto às soluções de distribuição do afluente, as principais variações verificadas foram quanto à distribuição ser por orifícios, aspersores ou registros, e quanto ao braço possuir ou não uma chapa difusora acoplada na geratriz inferior, ou acoplada individualmente nos aspersores ou registros.

Enquanto os orifícios tendem a formar um jato pontual e mais forte, os aspersores difundem o jato, melhorando a uniformidade da distribuição do afluente e preservando a camada de biofilme estabelecida na superfície mais exposta do filtro.

Para proporcionar um efeito semelhante aos aspersores em sistemas compostos apenas por orifícios de distribuição, podem ser instaladas chapas difusoras na geratriz inferior dos braços. A chapa difusora proporciona o melhor espalhamento do afluente na superfície do filtro e contribui com a homogeneidade na distribuição, evitando, da mesma forma, a formação de um jato pontual e mais forte tal que prejudique o biofilme aderido à superfície mais externa do filtro.

Na Figura 50 são mostrados diferentes tipos de sistemas de distribuição, com orifícios, com aspersores e com registros para controle de vazão, com ou sem chapa difusora acoplada. Já a Figura 51 evidencia o leque formado pela chapa difusora.

Figura 50 – Diferentes configurações de sistemas de distribuição



FONTE: Arquivo do Autor (2016), Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Sistema de distribuição com orifícios de mesmo diâmetro, meio suporte em pedra lava e biofilme aderido à pedra (ETE *Neuhausen*). (b) Sistema de distribuição com orifícios de diferentes diâmetros, redução do diâmetro do tubo ao longo do braço, meio suporte em plástico estuturado de fluxo cruzado recém instalado (ETE *Kempton*). (c) Sistema de distribuição com orifícios de mesmo diâmetro, chapa difusora acoplada ao braço, meio suporte em plástico tipo tubo colmeia e biofilme aderido (ETE *Sindelfingen*). (d) Sistema de distribuição com aspersores com registro, meio suporte em pedra brita, ainda com pouco biofilme aderido (ETE 04).



Figura 51 – Braços com chapa difusora acoplada para uniformizar a distribuição de vazão



FONTE: Arquivo do Autor (2017); Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Efeito da distribuição uniforme nas marcas de água na chapa difusora acoplada (ETE Sindelfingen). (b)(c) Detalhe para o leque formado pela chapa difusora (ETE Sindelfingen e ETE 17).

Da mesma forma, quando os orifícios são substituídos por registros individuais, é possível acoplar uma chapa para cada registro, objetivando a formação de um leque de distribuição do afluente. Na Figura 52 é possível verificar esta solução empregada em uma ETE no Paraná.

Figura 52 – Registro com chapa difusora individual acoplada



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Aspersor com registro e com chapa difusora individual acoplada. (b) Braço com registros com chapa difusora e efeito de leque na distribuição (ETE 04).

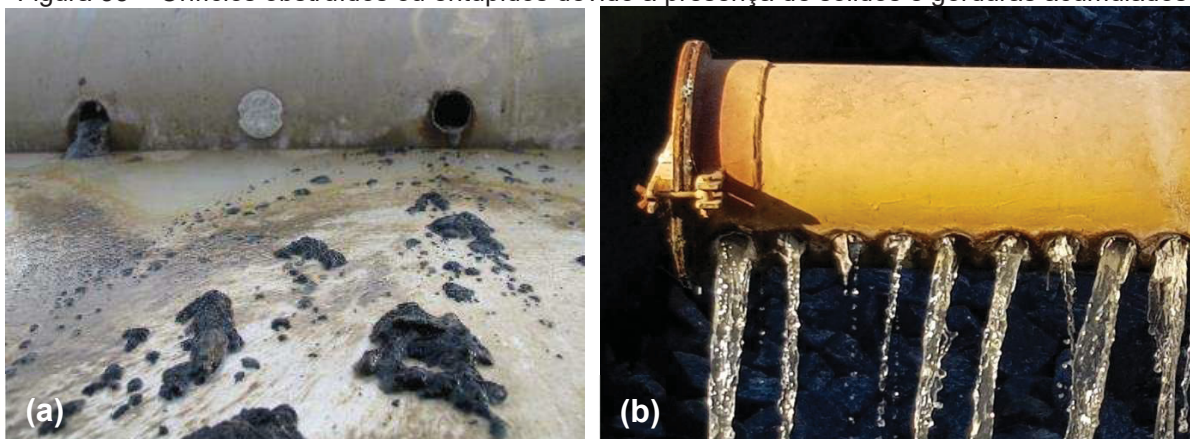
Por melhorar o espalhamento e a distribuição do afluente na superfície alimentada, contribuir com a homogeneidade na distribuição, suavizar os jatos formados pelos orifícios de distribuição, protegendo a camada de biofilme aderida à superfície mais externa do filtro, o emprego da chapa difusora mostrou-se interessante

e é recomendado como uma solução simples e eficaz, auxiliando o bom funcionamento dos filtros percoladores.

#### 4.4.2.7 A influência de materiais sólidos no sistema de distribuição da vazão afluyente e a importância da manutenção preventiva

Em diversas ETEs, foram verificadas situações em que há redução de seção ou entupimento dos orifícios, aspersores ou registros do sistema de distribuição. Isso ocorre em função do acúmulo de materiais sólidos, gorduras ou incrustações no sistema, prejudicando a uniformidade da distribuição do afluyente. Estas situações foram registradas tanto nas ETEs visitadas no Paraná quanto no Sul da Alemanha e estão representadas na Figura 53.

Figura 53 – Orifícios obstruídos ou entupidos devido à presença de sólidos e gorduras acumulados



FONTE: Arquivo do Autor (2017), Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2018).

**Notas:** Orifícios com seção reduzida e obstruída em função do acúmulo de gorduras e sólidos na <sup>(a)</sup> ETE Sindelfingen e na <sup>(b)</sup> ETE 10.

A realização de manutenção preventiva periódica do sistema de distribuição do filtro percolador, com atividades programadas para limpeza e desobstrução dos orifícios ou bicos aspersores e dos braços de distribuição, é fundamental para a boa operação do filtro percolador.

Nas ETEs no Paraná em que os filtros percoladores estão em bom estado de operação, foi verificado que a limpeza dos braços é realizada periodicamente, sendo a frequência mínima diária e máxima semanal, conforme características de cada ETE.

As atividades de manutenção e limpeza incluem vistoria e desobstrução dos orifícios e abertura da extremidade dos braços. Para a abertura da extremidade, é ideal que seja colocado um cesto com malha fina logo abaixo para que os sólidos não



sejam despejados no meio suporte ou na canaleta do efluente do filtro percoaldor. O fluxo hidráulico é induzido normalmente com a aplicação pontual de força na extremidade, inclinando levemente o braço.

Na Figura 54 estão apresentados o detalhe da extremidade do braço de distribuição, o momento da abertura para limpeza e manutenção e o cesto para retenção de resíduos, cuja utilização é indicada quando da abertura da extremidade dos braços para limpeza e manutenção.

Figura 54 – Acesso para limpeza na extremidade do braço de distribuição



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2015, 2018).

**Notas:** (a) Extremidade do braço fechada (ETE 16). (b) Momento da abertura da extremidade do braço para limpeza (ETE 08). (c) Cesto para reter os resíduos no momento da abertura da extremidade do braço (ETE 02).

Para evitar materiais sólidos, gorduras, óleos e graxas no sistema de distribuição do filtro percolador, recomenda-se, portanto, que a ETE possua sistema de tratamento preliminar eficiente para retenção de sólidos grosseiros, areia, óleos e gorduras do afluente. Adicionalmente, indica-se o emprego de uma peneira estática, evitando que outros sólidos que se aglutinaram na etapa de tratamento anterior, no decantador primário ou no reator anaeróbio, sejam arrastados para o sistema de distribuição do filtro percolador.

Aliar atividades de manutenção preventiva do sistema de distribuição do filtro a um adequado sistema preliminar para retenção de sólidos, areia, óleos e gorduras reduz ou até mesmo elimina problemas relacionados ao entupimento do sistema de distribuição e à colmatação do meio suporte.

Nas ETEs do Paraná, gorduras, óleos e graxas são retidos e acumulados no reator anaeróbio, formando a espuma, necessitando remoção periódica, podendo ser realizada manualmente ou por sistemas variados, conforme citado no item 4.4.1.4.

Já nas ETEs na Alemanha, normalmente é utilizada a caixa de areia aerada, retendo boa parte da gordura ainda na etapa preliminar de tratamento. Os decantadores primários também retêm e acumulam gorduras, óleos e graxas, formando a espuma, que, da mesma forma, deve ser removida periodicamente.

#### 4.4.2.8 Uniformidade da distribuição da vazão afluyente

Quanto às soluções empregadas para buscar uniformidade de distribuição da vazão por área superficial, na Figura 55, na Figura 56, na Figura 57 e na Figura 58 estão exemplificadas soluções de manutenção da uniformidade de distribuição de vazão proporcional à área do filtro, variando a distância entre os orifícios, de mesmo diâmetro, ao longo do braço.

Figura 55 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Espaçamento diferente entre os orifícios de distribuição para manter a mesma taxa de aplicação hidráulica em toda a superfície do filtro percolador (ETE 05).

Figura 56 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2018).

**Nota:** Espaçamento diferente entre os orifícios de distribuição para manter a mesma taxa de aplicação hidráulica em toda a superfície do filtro percolador (ETE 07).



Figura 57 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2018).

**Nota:** Espaçamento diferente entre os orifícios de distribuição para manter a mesma taxa de aplicação hidráulica em toda a superfície do filtro percolador (ETE 10).

Figura 58 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** Espaçamento diferente entre os orifícios de distribuição para manter a mesma taxa de aplicação hidráulica em toda a superfície do filtro percolador (ETE Neuhausen).

Já na Figura 59, observa-se que os orifícios são igualmente espaçados, porém alguns são abertos e outros tampados, regulando, da mesma forma, a distribuição da vazão ao longo do braço para que seja proporcional à área alimentada.

Figura 59 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** Orifícios abertos e fechados e chapa difusora acoplada ao braço e efeito da distribuição uniforme nas marcas de água na chapa (ETE Sindelfingen).

Por fim, na Figura 60, é exemplificada a solução em que os orifícios estão igualmente espaçados, porém com diferentes diâmetros ao longo do braço distribuidor, visando à distribuição da vazão afluyente de forma proporcional à área alimentada por aquele segmento do braço.

Figura 60 – Sistema de distribuição com soluções para promover a distribuição uniforme da vazão



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

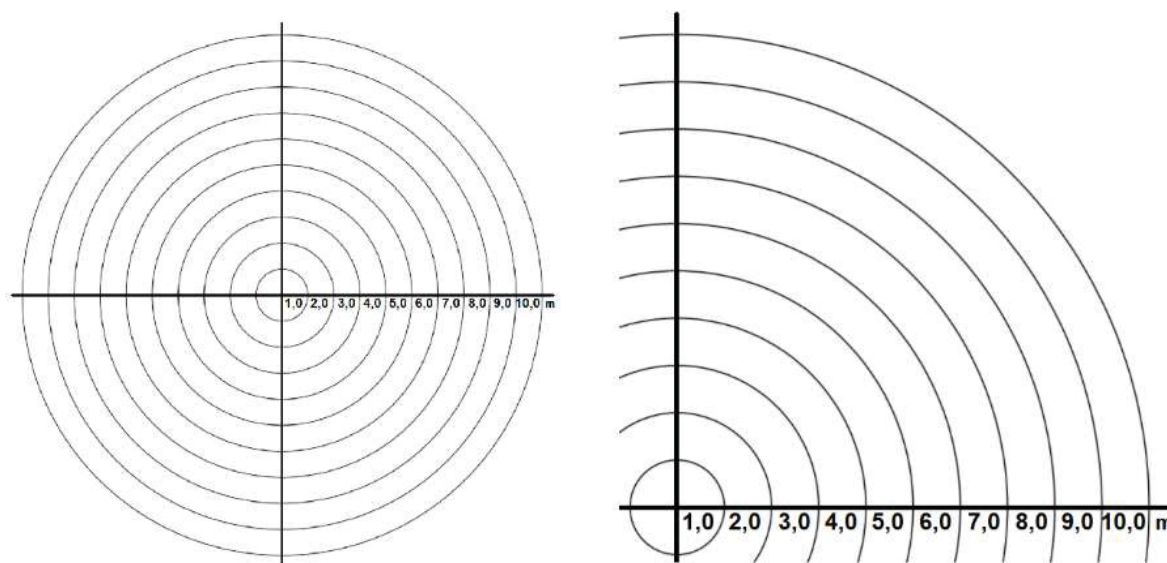
**Nota:** Orifícios igualmente espaçados, porém com diferentes diâmetros, e diferença de diâmetro da tubulação ao longo do braço (ETE *Kempton*).

Ainda na Figura 60, é possível identificar também a alteração do diâmetro do braço de distribuição, reduzindo o diâmetro nominal da tubulação no último segmento do braço. Estas soluções podem ser empregadas de forma combinada, principalmente quando se trata de filtros percoladores com maiores diâmetros.

Se os orifícios apresentarem o mesmo diâmetro e estiverem igualmente espaçados ao longo do braço, a distribuição da vazão por área será não uniforme, porque cada metro do braço aplicaria a mesma vazão em uma área diferente.

Para exemplificar este fato, a Figura 61 e a Tabela 23 apresentam uma simulação elaborada nesse estudo em que foi considerado um filtro de raio igual a 10 m. Para cada seção de 1 m de braço distribuidor foram calculadas as áreas alimentadas correspondentes, representadas pelos “anéis de alimentação”. A partir da área total da superfície do filtro e das áreas parciais correspondentes a cada segmento de 1 m do braço, foi possível obter uma proporção entre as áreas de cada anel de alimentação e a área total da superfície do filtro. A distribuição uniforme da vazão realizada ao longo do braço e em toda a superfície do filtro deve obedecer a essa mesma proporção obtida ao considerar os anéis de alimentação, obtendo, assim, uma taxa de aplicação hidráulica uniforme em qualquer ponto da superfície do filtro.

Figura 61 – Representação da superfície de um filtro percolador de raio igual a 10,0 m segmentado de metro a metro para simulação de área equivalente alimentada por segmento de raio



FONTE: O Autor (2017).

Tabela 23 – Simulação de área equivalente alimentada para cada segmento do braço de distribuição

Segmento	Raio	Área total (m <sup>2</sup> )	Segmento (m)	Área alimentada (m <sup>2</sup> )	% de área alimentada em relação à área total
1º	1,0	3,14	0,0 a 1,0	3,14	1,0 %
2º	2,0	12,57	1,0 a 2,0	9,42	3,0 %
3º	3,0	28,27	2,0 a 3,0	15,71	5,0 %
4º	4,0	50,27	3,0 a 4,0	21,99	7,0 %
5º	5,0	78,54	4,0 a 5,0	28,27	9,0 %
6º	6,0	113,10	5,0 a 6,0	34,56	11,0 %
7º	7,0	153,94	6,0 a 7,0	40,84	13,0 %
8º	8,0	201,06	7,0 a 8,0	47,12	15,0 %
9º	9,0	254,47	8,0 a 9,0	53,41	17,0 %
10º	10,0	314,16	9,0 a 10,0	59,69	19,0 %

FONTE: O Autor (2017).

**Notas:** <sup>(1)</sup> Cada segmento é equivalente a 1 m de braço, para um filtro de raio igual a 10 m.

<sup>(2)</sup> A “área total” refere-se à área para uma circunferência de raio igual a 1 m, 2 m e assim por diante, até 10 m. <sup>(3)</sup> A “área alimentada” e a “percentagem de área alimentada em relação à área total” referem-se apenas a cada segmento de raio, ou seja, a cada “anel”, sendo o 1º de 0 a 1 m, o 2º de 1 a 2 m, e assim por diante, até o 10º segmento.

A simulação mostra que a cada segmento de 1 m de braço, a área do anel de alimentação correspondente ao segmento aumenta em 2 % em relação à área do anel anterior, variando, neste caso do exemplo, de 3,14 a 59,69 m<sup>2</sup>, ou de 1 a 19 % em relação à área total da superfície do filtro, sendo, portanto, uma diferença significativa em termos de taxa de aplicação hidráulica para o meio suporte.

A distribuição da vazão deve ser projetada respeitando esta proporção entre segmento do braço e área superficial alimentada, visando à manutenção da uniformidade da taxa de aplicação hidráulica em todo o volume do filtro.



As soluções propostas incluem, portanto, orifícios de mesmo diâmetro ou aspersores ou registros de mesma vazão igualmente espaçados, porém alguns abertos e outros fechados; orifícios ou aspersores ou registros de diâmetros e vazões iguais, porém com diferentes espaçamento entre eles; orifícios ou aspersores ou registros de diâmetros e vazões diferentes para cada trecho do braço; e braço com redução de seção ou de diâmetro, sendo que estas soluções podem ser empregadas de forma combinada, principalmente para filtros com maiores dimensões.

Considerando que a proporção será sempre a mesma, as opções que incluem soluções definitivas são mais interessantes, já que eliminam a possibilidade de alteração. Nesse sentido, as soluções de espaçamento diferente entre os orifícios são mais interessantes se comparadas às de orifícios tampados ou registros fechados.

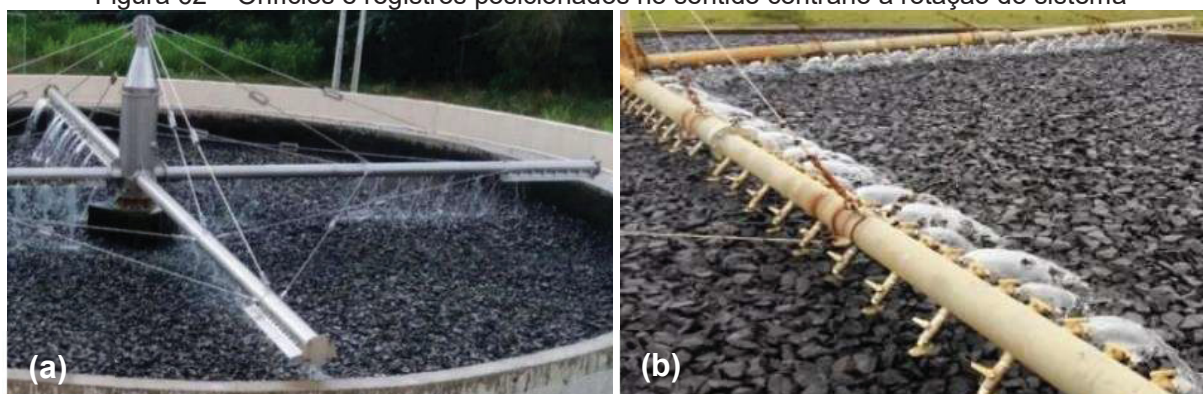
Para verificar se a distribuição está uniforme, pode-se realizar um teste de uniformidade da taxa de aplicação hidráulica, conhecido como “teste das painelas”, que consiste em distribuir, do eixo ao perímetro mais externo, vários recipientes graduados e com o mesmo volume sobre a superfície do filtro percolador e, após um intervalo de tempo em operação, verificar se todos os recipientes contém o mesmo volume de afluente.

Esse teste simples verifica se qualquer ponto da superfície do filtro recebe aproximadamente a mesma vazão ou se ocorre a não uniformidade da distribuição da vazão por área superficial do filtro. Recomenda-se que a especificação básica do sistema de distribuição contemple que a execução desse teste de uniformidade deve ser realizada pelo fornecedor do equipamento no local da obra, após a instalação, sendo possível realizar ajustes de nível ou mesmo verificar qualquer problema que comprometa a distribuição uniforme.

#### 4.4.2.9 Manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição

Quanto à manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição, há sistemas em que a rotação ocorre apenas pela força hidráulica. Nestes casos, verificou-se na maioria das ETEs visitadas que os sistemas de distribuição possuem orifícios, aspersores ou registros nos dois lados do braço, conforme mostrado na Figura 62.

Figura 62 – Orifícios e registros posicionados no sentido contrário à rotação do sistema



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** <sup>(a)</sup> Apenas a extremidade dos braços possui orifícios posicionados no sentido contrário à rotação (ETE 17). <sup>(b)</sup> Toda a extensão dos braços possui registros posicionados no sentido contrário à rotação (ETE 04).

Abrindo ou fechando estes orifícios, aspersores ou registros, ocorre redução ou aumento da velocidade de rotação do sistema, de tal forma que a velocidade pode ser regulada e controlada em função da vazão afluyente. Para estes casos, quanto mais constante for a vazão afluyente ao filtro, menos será necessário alterar a regulação de registros abertos e fechados para manter a velocidade ideal e constante.

A manutenção da velocidade de rotação a partir do controle da vazão constante é um dos motivos para promover a recirculação do efluente do filtro de forma combinada com a vazão afluyente à ETE, conforme abordado no item 4.4.2.19.

Quando a vazão afluyente à ETE apresenta variação significativa ao longo do dia e o sistema é movido apenas pela força hidráulica, há variações da velocidade de rotação. A redução da velocidade de rotação ou até mesmo a parada do sistema de distribuição provoca a lavagem excessiva do meio suporte e impede que o biofilme se desenvolva adequadamente, fazendo com que o filtro percolador não apresente a eficiência esperada.

Em diversas ETES visitadas no Paraná foi verificado que a velocidade de rotação do sistema varia significativamente ao longo do dia, em função da variação de vazão afluyente à ETE. As equipes de operação relataram que em horários de baixa vazão, a força hidráulica não é suficiente para manter o sistema em movimento constante, resultando em momentos com velocidade inferior e momentos em que o sistema de distribuição não rotaciona. Nessa situação, a vazão afluyente não é distribuída ao longo da área superficial do filtro, mas sim passa a ser distribuída apenas em uma faixa de meio suporte, podendo causar o desprendimento do biofilme

por aumentar a taxa de aplicação hidráulica apenas nessa área e podendo prejudicar o desenvolvimento do biofilme no restante do meio suporte em função da falta de molhamento, prejudicando a eficiência do tratamento.

Dentre as ETEs visitadas no Paraná, algumas já implantaram sistema para recirculação do efluente do filtro ou do decantador secundário para combinar a vazão afluente com a vazão de recirculação de forma a suprir os períodos de baixa vazão, refletindo na manutenção da alimentação constante do filtro. Outras, no entanto, seguem com problemas relacionados ao sistema de distribuição e às variações de vazão afluente e não praticam a recirculação, impedindo o funcionamento adequado e a eficiência esperada. Há casos ainda em que a operação inutilizou por tempo indeterminado o filtro em função de problemas relacionados à manutenção da velocidade de rotação e da vazão constante afluente ao filtro.

Quanto às ETEs visitadas na Alemanha, todas possuem sistema de recirculação visando à manutenção da velocidade de rotação constante apenas por meio de força hidráulica. O sistema de recirculação nesses casos é projetado para variar a vazão de recirculação conforme a vazão afluente da ETE, de forma que a soma das duas parcelas resulte sempre em uma vazão constante afluente ao filtro.

A vazão afluente ao filtro também pode ser controlada utilizando tanques de equalização, porém isso representaria estruturas adicionais ao fluxograma da ETE.

Em algumas ETEs visitadas no Paraná, foi verificado o emprego de motor de 0,5 a 1,0 cv, com inversor de frequência, para manutenção da velocidade constante, conforme mostrado na Figura 63.

Figura 63 – Sistema de distribuição com motor



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista do filtro percolador. (b) Detalhe do motor instalado no eixo do sistema de distribuição (ETE 19).



A rotação do sistema nesses casos continua sendo realizada pela força hidráulica, porém nos momentos em que a vazão é reduzida ou aumentada, o motor opera acelerando ou desacelerando a rotação do sistema, preservando a velocidade resultante constante.

Para ETEs que não possuem vazão constante ou equalizada, a utilização de motor no sistema de distribuição é uma solução para manter a velocidade de rotação constante, não resolvendo a questão da variação da taxa de aplicação hidráulica ao longo do dia, já que essa variável está em função da vazão afluente à ETE e da vazão afluente ao filtro.

A manutenção mecânica preventiva de todo o sistema, incluindo lubrificação dos rolamentos, verificação do funcionamento da engraxadeira e dos rolamentos da coluna central e demais componentes, limpeza e inspeção periódicas, também são fundamentais para o funcionamento adequado do sistema de distribuição.

#### 4.4.2.10 Consequências da distribuição não uniforme

O fato de uma ETE não dispor de um sistema de tratamento preliminar adequado, associado ou não à falta de manutenção preventiva do sistema preliminar e do sistema de distribuição afluente ao filtro, pode causar entupimento. Situações de vazão significativamente inferior à capacidade do sistema também fazem com que sólidos e gorduras fiquem acumulados nos orifícios ou aspersores e acabem por obstruir os orifícios, ocasionando a variação da taxa de aplicação hidráulica ao longo da área superficial do filtro percolador, conforme exemplificado na Figura 64.

Figura 64 – Distribuição irregular no filtro percolador



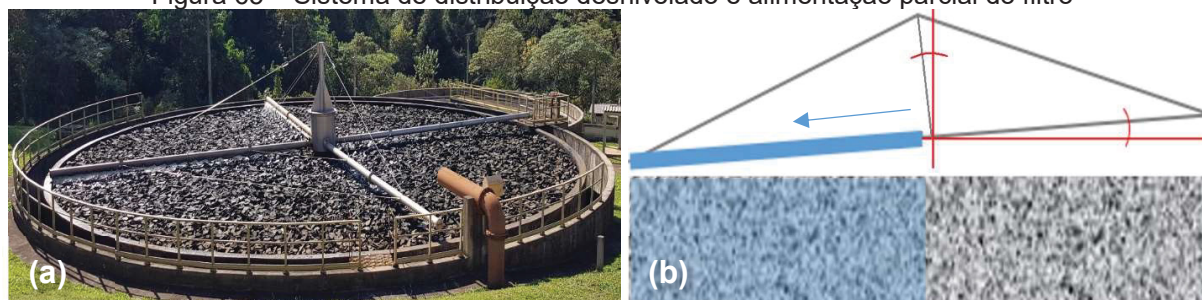
FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Observa-se orifícios obstruídos e zonas da superfície do filtro com acúmulo de afluente, indicando a aplicação de taxas hidráulicas variadas ao longo da área superficial do filtro (ETE 18).

A variação da velocidade de rotação do sistema, em função da variação da vazão afluyente ao filtro ao longo do dia, também implica em variações da taxa de aplicação hidráulica, prejudicando a eficiência do tratamento.

Além da manutenção da velocidade de rotação constante e da vazão afluyente ao filtro constante, o nivelamento do sistema de distribuição em relação ao eixo também é fundamental para a distribuição uniforme. Em algumas ETEs visitadas, foi constatado que o equipamento não estava nivelado, ocasionando um desbalanceamento do equipamento de forma que a vazão era encaminhada apenas para um lado do filtro. À medida que o sistema rotacionava, de um lado do filtro o braço passava sempre mais baixo enquanto do outro lado, sempre mais alto. A diferença de altura entre os braços fazia com que a vazão afluyente fosse sempre para o braço com a extremidade em cota mais inferior, alimentando apenas uma parte do volume do filtro, conforme verificado e exemplificado na Figura 65.

Figura 65 – Sistema de distribuição desnivelado e alimentação parcial do filtro



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2018); O Autor (2018).

**Notas:** (a) Os dois braços à direita da foto estão mais altos em relação ao eixo, fazendo com que a vazão seja distribuída nos braços mais baixos, com o braço mais à esquerda começando a encher e com o braço mais ao fundo na foto já cheio, distribuindo a vazão e alimentando apenas aquela porção da área superficial do filtro, que recebe toda a vazão afluyente (ETEs 07 e 08). (b) Representação do sistema de distribuição desnivelado, com o preenchimento de afluyente apenas no braço mais baixo e o molhamento de apenas parte do volume do meio suporte.

A distribuição não uniforme desencadeia uma série de problemas que comprometem o funcionamento do filtro. A não uniformidade da taxa de aplicação hidráulica em todo o volume do meio suporte e, conseqüentemente, a não uniformidade do crescimento do biofilme, faz com que uma parte do volume do meio suporte esteja em sobrecarga hidráulica, enquanto a outra parte do volume esteja subaproveitada ou inutilizada, comprometendo o funcionamento adequado do filtro e a eficiência esperada para o tratamento.

A parte do volume de meio suporte que recebe mais vazão está em sobrecarga e fica em situação de lavagem ou *flushing* constantemente, ocasionando

excessiva perda de sólidos e dificuldade de fixação e crescimento do biofilme em função da alta taxa de aplicação hidráulica.

Já a parte subaproveitada do volume do meio suporte resulta em baixo ou nulo crescimento do biofilme por falta de alimento para os micro-organismos, fazendo com que a biomassa seja reduzida, seca e ineficiente, ou mesmo inexistente. A formação de caminhos preferenciais, a proliferação de moscas e vetores e a geração de maus odores, entre outros aspectos observados também são consequências da distribuição não uniforme.

As falhas de distribuição resultam na não formação de biofilme. Na Figura 66, são nítidas as regiões do meio suporte com falha de crescimento do biofilme, em função da distribuição não uniforme. Outros aspectos relacionados ao crescimento do biofilme são abordados nos itens 4.4.2.14 e 4.4.2.17.

Figura 66 – Falhas na formação do biofilme



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** É possível relacionar os orifícios obstruídos com as linhas mais escuras sem biofilme na superfície do filtro (ETE 09).

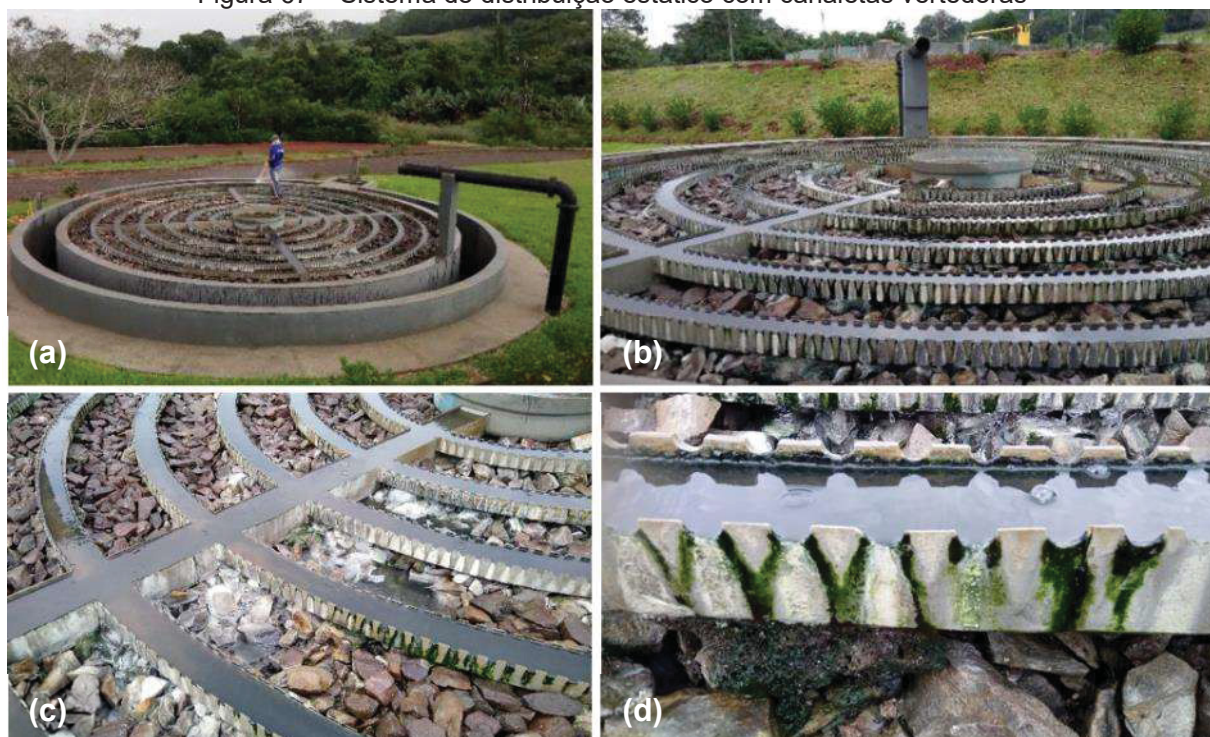
Levantados, observados e discutidos todos os aspectos referentes à distribuição do afluente, é notada a importância e a relevância da manutenção da uniformidade e homogeneidade da distribuição e da taxa de aplicação hidráulica em qualquer ponto da superfície do filtro percolador, visando o aproveitamento máximo e adequado do meio suporte e proporcionando as condições ideais para que o tratamento biológico ocorra de forma satisfatória e alcance a eficiência esperada.



#### 4.4.2.11 Outras variações de sistema de distribuição da vazão afluyente

Em uma das ETEs visitadas no Paraná, o sistema de distribuição parou de funcionar completamente e a equipe de operação projetou e instalou um sistema de distribuição estático, mostrado na Figura 67, em substituição ao sistema rotativo. O sistema recebe a vazão afluyente no centro do filtro e a distribuição ocorre através das canaletas vertedoras.

Figura 67 – Sistema de distribuição estático com canaletas vertedoras



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista geral do filtro percolador. (b) Vista parcial do sistema de distribuição estático. (c) Áreas com acúmulo de afluyente na superfície do meio suporte. (d) Detalhe dos vertedores de distribuição do afluyente (ETE 20).

A distribuição nesse caso tende a ser proporcional à área alimentada, já que o número de vertedores aumenta à medida que o raio do filtro aumenta, favorecendo a uniformidade da taxa de distribuição hidráulica na superfície do filtro e proporcionando bom aproveitamento de todo o volume de meio suporte.

O sistema estático com canaletas abertas e vertedores, em substituição ao sistema rotativo, oferece vantagens quanto à rotina de operação e manutenção, tanto de limpeza e desobstrução dos braços e dos orifícios distribuidores quanto dos componentes mecânicos e das peças do sistema rotativo, incluindo lubrificação de

peças, troca periódica de rolamentos, entre outras ações que não são necessárias para manutenção do sistema estático.

Apesar de a distribuição dos vertedores parecer favorável à obtenção da uniformidade da taxa de aplicação hidráulica, essa configuração de distribuidor estático desenvolvida pela operação tende a formar faixas com mais alimentação e faixas com menos alimentação, na área exatamente abaixo das canaletas, por exemplo, já que não recebem alimentação diretamente. Nesse caso, o projeto e a operação devem estar seguros de que o meio suporte oferece condições para que o afluente percole e se distribua de forma eficiente em todo o volume e ao longo do meio suporte ainda nas camadas mais superficiais do filtro.

Outro aspecto observado é que a distância entre a canaleta e a superfície do meio suporte nesse caso é inferior à recomendada por norma e pela literatura, não provocando cascadeamento durante a distribuição do afluente. A eliminação do cascadeamento reduz significativamente a possível emanção de odores e gases corrosivos provenientes do efluente do reator anaeróbio.

Por outro lado, pode diminuir também alguma incorporação de oxigênio que ocorra durante o cascadeamento. Ainda assim, a eficiência obtida pelo filtro da ETE em questão é semelhante a outros filtros percoladores analisados, sugerindo que a incorporação do oxigênio no afluente obtida durante o cascadeamento não parece ser significativa, sendo necessário realizar medições específicas de oxigênio para confirmar tal indicação.

Adaptações para melhorar esta solução adotada podem ser estudadas e desenvolvidas, principalmente visando à distribuição uniforme e homogênea do afluente em toda a área superficial do filtro.

Existem outros exemplos de sistemas estáticos de distribuição, compostos por rede de tubulações e aspersores que proporcionam uma distribuição uniforme em toda a área superficial do filtro. Nesses casos, o filtro percolador pode ser projetado com qualquer outra geometria. Um exemplo de sistema estático está apresentado na Figura 68.

Figura 68 – Exemplo de distribuidor estático



FONTE: Enviropro / Sewaco (2017).

**Notas:** (a) Aspecto da distribuição. (b) Detalhe do aspersor.

#### 4.4.2.12 Taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas

Analizando as taxas de aplicação hidráulica e as cargas orgânicas volumétricas verificadas atualmente em cada uma das ETEs com filtro percolador no Paraná, foram calculados os valores medianos praticados para essas duas variáveis que influenciam a eficiência do tratamento.

A verificação da taxa de aplicação hidráulica mediana praticada foi realizada a partir das medições de vazão e da área da superfície dos filtros, obtendo valores entre 2 e 27 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, sendo a mediana igual a 11 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d. Ressalta-se que os menores valores obtidos foram para ETEs que estão em fase inicial de operação ou que recebem vazão muito inferior à capacidade hidráulica da ETE.

A verificação da carga orgânica volumétrica mediana praticada para as ETEs que possuíam análise do efluente dos reatores anaeróbios foi realizada a partir da concentração de DBO e do volume dos filtros, sendo obtida a mediana de carga orgânica volumétrica igual a 0,31 kg/m<sup>3</sup>·d. Já para as ETEs que não dispunham de análises do efluente dos reatores anaeróbios, a carga orgânica afluenta aos filtros percoladores foi calculada a partir da estimativa de eficiência média do reator anaeróbio igual a 70 % para remoção de DBO, obtendo um valor mediano para a carga orgânica volumétrica igual a 0,58 kg/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO. Ainda, quando a ETE só dispunha de análise em termos de DQO, utilizou-se da relação DQO/DBO igual a 2,9 para efluente de reator anaeróbio.

A partir dos valores calculados e dos valores estimados, foi possível afirmar que os filtros percoladores analisados no período de 2017 no Paraná operam com taxa de aplicação hidráulica mediana característica de filtros de alta taxa, praticando valores mais próximos ao limite inferior da faixa estabelecida em literatura, de 4 a



50 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d. Quanto à carga orgânica volumétrica, considerando que a literatura estabelece que 0,4 kg/m<sup>3</sup>·d é o limite entre baixa e alta carga, os filtros percoladores analisados no Paraná operam com carga orgânica volumétrica próxima a esse limite.

Nas quatro ETEs visitadas na região metropolitana de Curitiba, foram verificadas taxas de aplicação hidráulica medianas entre 6,6 e 13,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d e carga orgânica volumétrica mediana entre 0,1022 e 0,2970 kg/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO. O efluente final apresentou concentração de DQO entre 66 e 91 mg/l e de DBO entre 13 e 19 mg/l. Estes valores foram obtidos a partir da mediana de 8 a 19 análises de amostras pontuais e compostas para cada ETE, durante cinco meses de operação.

Em duas ETEs visitadas na região norte do Paraná, foram verificadas taxas de aplicação hidráulica medianas entre 6,9 e 7,7 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d e carga orgânica volumétrica mediana estimada entre 0,1022 e 0,2970 kg/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO. O efluente final apresentou concentração de DQO entre 129 e 176 mg/l e de DBO entre 25 e 34 mg/l. Estes valores foram obtidos a partir da mediana de 11 a 25 análises de amostras pontuais e compostas para cada ETE, durante um ano de operação.

Em outras três ETEs visitadas, também na região norte, que operam atualmente com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, as cargas orgânicas volumétricas medianas variaram de 0,3311 a 0,4728 kg/m<sup>3</sup>·d. Ressalta-se que para meio suporte plástico, a carga orgânica recomendada em literatura para filtros que objetivam a degradação de matéria orgânica é de 0,6 a 3,0 kg/m<sup>3</sup>·d. O fato de a carga orgânica volumétrica ser muito inferior à recomendada pode indicar uma das principais razões para o baixo desenvolvimento do biofilme no meio suporte plástico nesses filtros e para a consequente eficiência aquém do esperado em algumas das análises realizadas. O item 4.4.2.14 discute sobre o crescimento do biofilme e apresenta o meio suporte plástico de uma das ETEs visitadas como exemplo de uma situação de baixo crescimento.

Outra configuração diferente verificada nas ETEs do Paraná foi, não quanto ao meio suporte, mas sim quanto à utilização de sistema de filtro percolador e decantador secundário em série.

Em uma das ETEs visitada na região central do Estado, foi possível verificar os resultados obtidos com os filtros percoladores operando em série e em paralelo, antes e depois da alteração do fluxograma da ETE. Originalmente, a ETE operava com dois filtros e dois decantadores secundários em paralelo. Visando à melhoria do efluente final, foi realizada uma adaptação com a implantação de uma elevatória de

recuperação de nível para possibilitar a operação dos dois conjuntos de filtro percolador e decantador secundário em série.

Na condição inicial de operação dos dois conjuntos em paralelo, foi verificada taxa de aplicação hidráulica mediana de  $6,7 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  e carga orgânica volumétrica mediana estimada em  $0,2375 \text{ kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  em termos de DBO, sendo o efluente final com concentração de DQO mediana igual a  $74 \text{ mg}/\text{l}$ , a partir de 65 amostras pontuais.

Já na segunda condição de operação, com os dois conjuntos em série, a taxa de aplicação hidráulica mediana passou para  $13,4 \text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  e a carga orgânica volumétrica mediana estimada, para  $0,5688 \text{ kg}/\text{m}^3\cdot\text{d}$  em termos de DBO, sendo o efluente final com concentração de DQO mediana igual a  $46 \text{ mg}/\text{l}$ , a partir de 33 amostras, e de DBO igual a  $21 \text{ mg}/\text{l}$ , a partir de 11 amostras pontuais.

Esse caso sugere que os ganhos de eficiência ocorreram em função do aumento da taxa de aplicação hidráulica e da carga orgânica volumétrica, oferecendo mais alimento à biomassa no primeiro filtro e permitindo o melhor desenvolvimento do biofilme, e em função da alteração do fluxograma e da utilização do segundo conjunto de filtro e decantador secundário como tratamento terciário. Cabe ressaltar que um ganho de eficiência semelhante poderia ser obtido também ao aumentar a altura útil do meio suporte.

Para as ETEs visitadas na Alemanha, esse estudo não apresenta considerações em relação às taxas de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica e concentrações do efluente, pois as ETEs apresentam variações significativas quanto aos processos unitários a montante e a jusante do filtro, bem como em relação à concentração do afluente, em função das águas pluviais, e da prática de recirculação, sendo pouco conclusivo apresentar valores ou mesmo estabelecer comparações com as ETEs visitadas no Paraná.

#### 4.4.2.13 Necessidade de verificação de faixa de valores para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica para filtros com meio suporte plástico

Quanto aos valores sugeridos em literatura para a taxa de aplicação hidráulica e para carga orgânica volumétrica, para a brita são estabelecidas faixas de valores para filtros operando em alta e baixa taxa e em alta e baixa carga, sendo possível relacionar a operação em alta taxa ao objetivo de degradação de matéria orgânica e

a operação em baixa taxa ao objetivo de combinar a degradação de matéria orgânica e a nitrificação no mesmo filtro.

Já para o meio suporte plástico, são estabelecidas apenas faixas de valores para filtros operando em alta taxa. A literatura não apresenta, portanto, a mesma lógica de faixa de valores de referência para alta e baixa taxa de aplicação hidráulica e alta e baixa carga orgânica volumétrica para filtros percoladores com meio suporte plástico. Isso porque o meio suporte plástico possui maior área superficial específica justamente para possibilitar maior aplicação hidráulica e de carga orgânica por volume de meio suporte, não fazendo sentido estabelecer faixas de operação para baixa taxa ou baixa carga para filtros percoladores com meio suporte plástico.

À medida que foi iniciada a utilização de materiais plásticos como meio suporte, as equações de dimensionamento também foram incrementadas com novas variáveis, antes não consideradas. O fato de o plástico oferecer o aumento da área superficial específica e, ainda, de possuir maior capacidade de empilhamento, sem prejudicar a aeração natural, possibilitou aumentar a profundidade útil dos filtros.

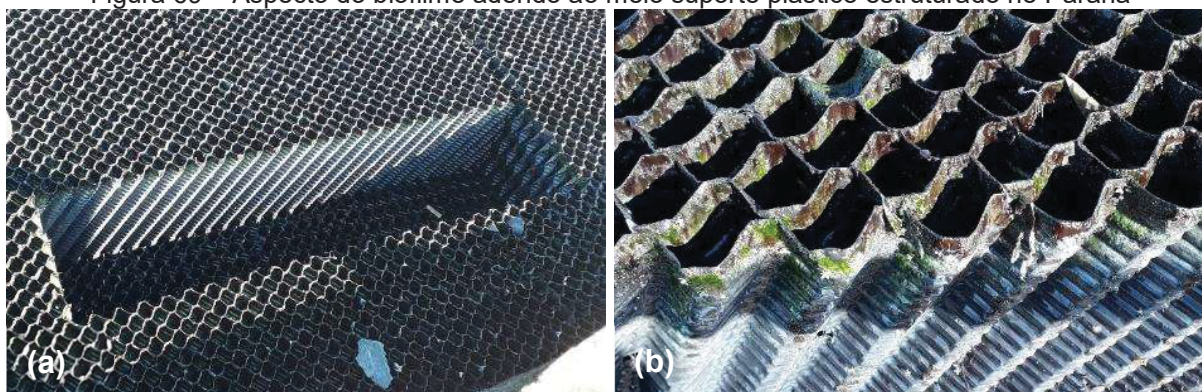
À medida que estas novas configurações foram utilizadas com meio suporte plástico, foram identificados filtros que operam com taxas de aplicação hidráulica elevadas e que, por possuírem maior área superficial por volume e maiores profundidades, atingem níveis de tratamento com remoção de matéria orgânica e nitrificação no mesmo filtro, em função da maior quantidade de biomassa por volume, proporcionada pela maior área disponível para crescimento do biofilme, e do maior tempo de contato entre a biomassa e o efluente em tratamento, obtido com o aumento da profundidade do filtro.

Assim, o presente estudo sugere que pode ser necessário verificar os valores sugeridos em literatura para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica para filtros percoladores com meio suporte plástico estruturado, estimando faixas de valores indicados para filtros que objetivam apenas a degradação da matéria orgânica e para filtros que objetivam a degradação da matéria orgânica combinada à nitrificação, da mesma forma como são apresentadas as faixas para filtros de baixa, média e alta taxa com meio suporte em pedra brita.

#### 4.4.2.14 Crescimento e controle do biofilme

Uma experiência quanto à deficiência de crescimento do biofilme foi observada nas ETEs com meio suporte plástico visitadas no Paraná. Aproveitando a possibilidade de fácil manuseio, a equipe de operação de uma das ETEs retirou um bloco de meio suporte plástico de fluxo cruzado e verificou um biofilme de fina espessura e predominantemente acinzentado, conforme mostrado na Figura 69.

Figura 69 – Aspecto do biofilme aderido ao meio suporte plástico estruturado no Paraná



FONTE: Arquivo da empresa Kelvion (2017).

**Notas:** (a) Bloco de plástico estruturado retirado. (b) Detalhe do biofilme predominantemente acinzentado, com poucos pontos verdes (ETE 14).

Em outras ETEs com meio suporte em pedra brita, também foi possível retirar manualmente a camada mais superior de pedra brita e verificar o aspecto do biofilme. Nessas ETEs foi verificado também um biofilme predominantemente acinzentado, com poucos pontos verdes, verificados em alguns casos mais na parte central do filtro, onde havia uma taxa de aplicação hidráulica maior, desproporcional em relação a outros pontos da superfície livre do meio suporte.

O fato de encontrar mais pontos verdes mais próximos ao eixo do sistema de distribuição pode estar relacionado à maior taxa de aplicação hidráulica nessa área, justamente por não haver distribuição de vazão proporcional à área alimentada, ao longo do braço, conforme discutido no item 4.4.2.8. A coloração verde verificada pode ser relacionada também à formação de algas.

Na Figura 70 é possível visualizar o aspecto acinzentado predominante do biofilme na pedra brita, apenas com alguns pontos esverdeados.



Figura 70 – Aspecto do biofilme aderido ao meio suporte em pedra brita no Paraná



FONTE: Arquivo do Autor (2018).

**Notas:** (a)(b)(c) Detalhe do biofilme predominantemente acinzentado, com poucos pontos verdes (ETE 07).

O biofilme verificado nesses casos no Paraná apresentou aspecto diferente do que foi visto nas ETEs visitadas na Alemanha, com coloração verde predominante, conforme mostrado anteriormente, nas figuras dos itens 4.4.2.1. e 4.4.2.6. A diferença de cor entre os biofilmes vistos na Alemanha e no Paraná podem estar associados à composição do afluente ao filtro percolador com mais matéria orgânica facilmente biodegradável proveniente dos decantadores primários nas ETEs da Alemanha, se comparado ao afluente ao filtro percolador proveniente de reatores anaeróbios, bem como à formação de algas na superfície do meio suporte.

O baixo desenvolvimento do biofilme pode ocorrer ainda em casos em que a taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica são muito baixas ou não são constantes, de tal forma que não há molhamento de toda a superfície disponível e, conseqüentemente, não há alimento suficiente para o desenvolvimento do biofilme. Nas ETEs supracitadas utilizadas como exemplo, foram identificados problemas de distribuição não uniforme e variações de vazão afluente, de taxas de aplicação hidráulica e de velocidade de rotação do sistema, indicando que o baixo crescimento do biofilme pode estar associado à alimentação com vazão variada e à distribuição não uniforme dos filtros. Garantir a combinação entre vazão e velocidade de rotação constantes e a alimentação constante e uniforme influencia positivamente o crescimento do biofilme e a eficiência do tratamento.

Foi verificado ainda em algumas ETEs a realização de uma limpeza periódica da superfície das pedras com hidro jato. Deve-se ressaltar que a utilização do hidro jato diretamente no meio suporte é prejudicial ao tratamento pois desprende o biofilme do meio suporte, não sendo, por esse motivo, indicada a prática de limpeza do meio suporte com hidro jato. A forma correta de realizar a lavagem do meio suporte

consistem em desacelerar a rotação do sistema de distribuição para aumentar a taxa de aplicação hidráulica em um período determinado de tempo, provocando o desprendimento da biomassa excedente e renovando o biofilme, conforme abordado no item 4.4.2.15.

Outra situação semelhante é a aplicação da taxa hidráulica acima do recomendado, ou tão alta quanto as taxas hidráulicas de lavagem, ou *flushing*, impedindo a fixação e o crescimento do biofilme ou causando a perda do biofilme já fixado e desenvolvido no meio suporte.

Para garantir a formação, fixação e crescimento adequados do biofilme, é necessário controlar as taxas hidráulicas e as cargas orgânicas volumétricas aplicadas, para que estas respeitem as faixas de operação definidas em projeto.

Por outro lado, para que o biofilme não cresça em excesso, formando zonas anaeróbias no biofilme, recomenda-se a lavagem, ou *flushing* do meio suporte periodicamente. A apresentação do que foi verificado sobre esse aspecto de lavagem e as discussões estão no item 4.4.2.15.

#### 4.4.2.15 Lavagem do meio suporte

Além da manutenção preventiva do sistema de distribuição afluente ao filtro percolador, tanto a literatura quanto os fornecedores de meio suporte plástico indicam a realização periódica de lavagem do meio suporte visando o controle do crescimento excessivo do biofilme, prevenindo ainda a colmatção do meio suporte e o crescimento de vetores, moscas e caramujos.

Esta operação consiste em aumentar a taxa de aplicação hidráulica e pode ser realizada diminuindo a velocidade do sistema de distribuição por um intervalo de tempo calculado para atingir a taxa de aplicação necessária para este procedimento. A literatura ressalta que essa variação de taxa hidráulica não deve exceder o dobro da taxa de operação normal do sistema.

Nas ETEs visitadas no Paraná, a operação relata que o procedimento de lavagem a partir da desaceleração da rotação do sistema de distribuição nunca foi praticado. Algumas ETEs fazem apenas uma limpeza superficial com hidro jato, porém essa prática não é indicada, já que a força do jato é muito agressiva ao biofilme e provoca a perda de toda a camada de biofilme, e não só da camada excedente, conforme já discutido no item 4.4.2.14.



Nas ETEs com meio suporte plástico visitadas na Alemanha, a operação afirmou que depois que o meio suporte foi trocado de pedra lava para plástico estruturado de fluxo cruzado, é realizada a lavagem periódica, conforme recomendações de literatura e do fornecedor do meio suporte plástico, com a desaceleração do sistema de distribuição, aumentando a taxa de aplicação hidráulica na superfície do filtro percolador em um intervalo de tempo determinado.

Para esse procedimento de manutenção do filtro percolador, o decantador secundário é de fundamental importância, pois retém a biomassa e os sólidos desprendidos do biofilme.

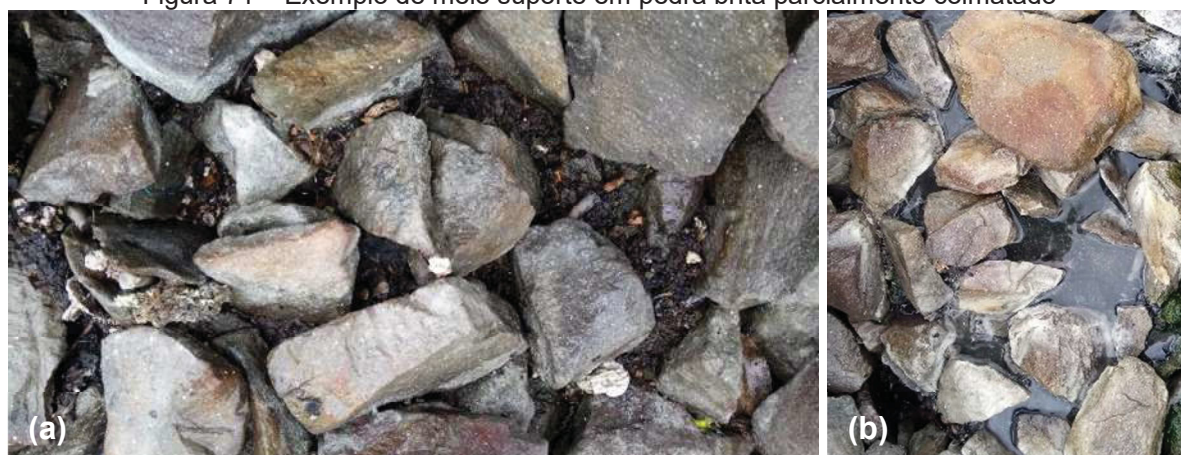
Para este aspecto, foi observado, portanto, que a lavagem deve ser executada, observando principalmente as taxas de aplicação hidráulica praticadas. Deve-se observar ainda o crescimento do biofilme, conforme discutido no item 4.4.2.14 anterior, a colmatção e a presença de predadores, conforme discutido nos itens 4.4.2.16 e 4.4.2.24 subsequentes, para determinar a periodicidade da lavagem, de forma a executar esse procedimento apenas quando necessário, sempre a favor dos processos que ocorrem no meio suporte.

#### 4.4.2.16 Colmatção e substituição do meio suporte

Os filtros percoladores podem sofrer processos de colmatção do meio suporte em função de um sistema preliminar menos eficiente quanto à retenção de sólidos grosseiros, areia e gorduras, ou em função da não retirada de espuma e descarga de lodo dos reatores anaeróbios, ou da ausência de manutenção preventiva e lavagem periódica do sistema de distribuição e do meio suporte. A colmatção ocorre de forma acelerada também quando a granulometria da pedra brita não é adequada ou quando o material contém muito pó de pedra ou é de origem sedimentar.

O meio suporte em pedra brita ou pedra lava propicia condições mais favoráveis à colmatção, se comparado aos materiais plásticos, por possuírem menor índice de vazios. O processo de colmatção inclui a formação de caminhos preferenciais e de zonas mortas ao longo da profundidade do filtro, o que faz com que o tempo de detenção hidráulica e, conseqüentemente, a eficiência do filtro sejam reduzidos. A Figura 71 exemplifica um meio suporte em pedra brita parcialmente colmatado.

Figura 71 – Exemplo de meio suporte em pedra brita parcialmente colmatado



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Presença de sólidos e resíduos no meio suporte. (b) Fluxo hidráulico descendente livre é prejudicado e causa acúmulo de afluente na camada mais superior da brita (ETE 20).

Em algumas das estações de tratamento de esgoto visitadas no Paraná e na Alemanha foi realizada a troca do meio suporte, de pedra brita ou pedra lava, para o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado.

Nas ETEs que foram objeto de estudo de Gomiero (2016), conforme citado no item 2.5.2.13, o meio suporte em pedra brita estava totalmente colmatado e a outorga contemplava metas progressivas para aumentar a eficiência do tratamento. A operação optou pela troca da pedra brita para o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado. As ETEs tiveram o dimensionamento do volume de meio suporte plástico adaptado às estruturas já existentes dos filtros. A altura útil dos filtros variou entre 1,5 e 2,5 m, podendo ser incrementada visando a melhoria da qualidade do efluente, dependendo de verificação de perdas de carga hidráulica, considerando, portanto, o aumento da altura útil dos filtros em etapa futura visando à melhoria do efluente final para o atingimento de metas progressivas.

Ao planejar a substituição do meio suporte, pode ser necessário realizar outras melhorias ou adaptações no filtro percolador, bem como nos demais processos a montante.

No caso das ETEs visitadas, além da troca do meio suporte, foram instalados equipamentos de gradeamento fino de 10 e 6 mm no sistema de tratamento preliminar e ainda cestos de aço inox na caixa divisora de fluxo a montante dos filtros percoladores visando à retenção de sólidos. Reformas importantes nos reatores anaeróbios também foram citadas como necessárias para melhorar a operação dos processos e a eficiência das ETEs. Por fim, a instalação de um novo sistema de

distribuição do afluente aos filtros foi necessária devido à corrosão do sistema. A Figura 72 apresenta registros de antes, durante e depois da substituição do meio suporte dos filtros percoladores.

Figura 72 – Aspecto visual de um dos filtros percoladores antes, durante e depois da troca do meio suporte de pedra brita para meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Filtro percolador com meio suporte em pedra brita, completamente colmatado e afogado, com afluente e espuma na superfície, com operação comprometida. (b)(c) Instalação do meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado. (d) Filtro percolador operando com meio suporte plástico (ETEs 14, 15 e 16).

Nas ETEs de médio e grande porte visitadas na Alemanha, a troca do meio suporte de pedra lava para plástico estruturado de fluxo cruzado ocorreu também por motivos de colmatção do meio suporte, aumento da população e da vazão afluente à ETE e necessidade de aumentar a eficiência do tratamento.



O processo de colmatção pode ser evitado ou desacelerado com diversas ações preventivas, do projeto à operação, conforme descrito na revisão de literatura e conforme discutido nos resultados deste estudo, nos diversos itens e aspectos abordados.

#### 4.4.2.17 Eficiência de molhamento do meio suporte

Conforme apresentado no item 2.5.2.14, o estudo de Medeiros (2011) indicou percentagens de área molhada em meio suporte em pedra brita e em plástico randômico (não estruturado), sendo as áreas superficiais específicas estimadas em 70 e 100 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, respectivamente, apresentando eficiências de molhamento entre 35 e 66 % para pedra brita e 27 a 50 % para o plástico randômico, concluindo que a eficiência de molhamento da superfície total do plástico randômico é inferior à da pedra brita.

A partir desses resultados, o presente estudo buscou uma relação de ganho efetivo entre a pedra brita e o plástico randômico quanto à área superficial específica. A Tabela 24 resume os cálculos estimativos realizados.

Tabela 24 – Estimativa de ganho efetivo de área superficial específica entre a pedra brita e o plástico randômico (não estruturado)

	Área superficial específica (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	Eficiência de Molhamento <sup>(1)</sup> (%)		Área superficial molhada (m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Pedra brita	70	35	66	24,5	46,2
Plástico randômico	100	27	50	27,0	50,0
Diferença de área	30	-	-	2,5	3,8
(Brita/Randômico) <sup>(2)</sup>	70,0 %	-	-	90,7 %	92,4 %
Diferença A <sub>esp</sub> f <sub>Brita</sub> <sup>(3)</sup>	42,9 %	-	-	10,2 %	8,2 %
Diferença A <sub>esp</sub> f <sub>Randômico</sub> <sup>(4)</sup>	30,0 %	-	-	9,3 %	7,6 %

FONTE: O Autor (2017), a partir de Medeiros (2011).

**Notas:** <sup>(1)</sup> Medeiros (2011). <sup>(2)</sup> Expressa a proporção da área superficial específica da pedra brita em relação à do plástico randômico. <sup>(3)</sup> Expressa a proporção da diferença de área em relação à área da pedra brita. <sup>(4)</sup> Expressa a proporção da diferença de área em relação à área do plástico randômico.

Os cálculos realizados a partir dos dados obtidos no estudo de Medeiros (2011) indicam que, para aquele caso, a área superficial molhada variou de 24,5 a 46,2 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para a pedra brita e 27,0 a 50,0 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> para o plástico randômico e que, entre mínimos e máximos da pedra e do plástico randômico, a variação foi de 2,5 a

3,8 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup> apenas, representando uma diferença real de 7,6 a 10,2 % entre as áreas superficiais molhadas da pedra brita e do plástico randômico por volume do meio suporte.

As propriedades e as condições oferecidas pelo meio suporte plástico randômico e pelo plástico estruturado de fluxo cruzado são distintas. O plástico estruturado de fluxo cruzado leva o nome de “fluxo cruzado” justamente por ter sido projetado para promover a melhor distribuição ao longo da profundidade do filtro, de modo a aumentar a eficiência de molhamento da área superficial específica disponível. Por esse motivo, não seria recomendado admitir aquelas estimativas obtidas para o plástico randômico como válidas para o plástico estruturado.

O presente estudo recomenda a realização de experimentos para comparar a eficiência de molhamento de pedra brita e de plástico estruturado de fluxo cruzado submetidos às mesmas condições, em regime de alta taxa e, principalmente, de baixa taxa, para verificar o ganho efetivo de área superficial específica útil entre os dois materiais. Essa estimativa pode ser um fator a ser acrescentado nos estudos de concepção e de viabilidade de novos filtros percoladores.

#### 4.4.2.18 Aeração natural e arraste de ar no interior do filtro percolador

Os projetos das ETEs analisadas no Paraná priorizaram a locação dos processos unitários de tal forma a combinar a topografia do terreno com o caminhamento do esgoto por gravidade ao longo do fluxograma da ETE. Assim, na maioria das ETEs, os filtros percoladores foram concebidos em cota inferior à dos reatores anaeróbios, estando totalmente ou parcialmente abaixo da cota do terreno natural, com todo o fluxo hidráulico por gravidade, sem elevatórias de recuperação de nível entre processos.

Essa concepção justifica o fato de que todas as ETEs analisadas no Paraná possuem filtros percoladores com parede dupla, para que as aberturas para entrada de ar e para saída do efluente final no perímetro inferior do filtro se comuniquem com o ar externo, permitindo fluxo de ar e troca de ar entre o meio interno e externo, ou seja, permitindo a aeração natural do filtro percolador, mesmo com o filtro enterrado ou semienterrado.

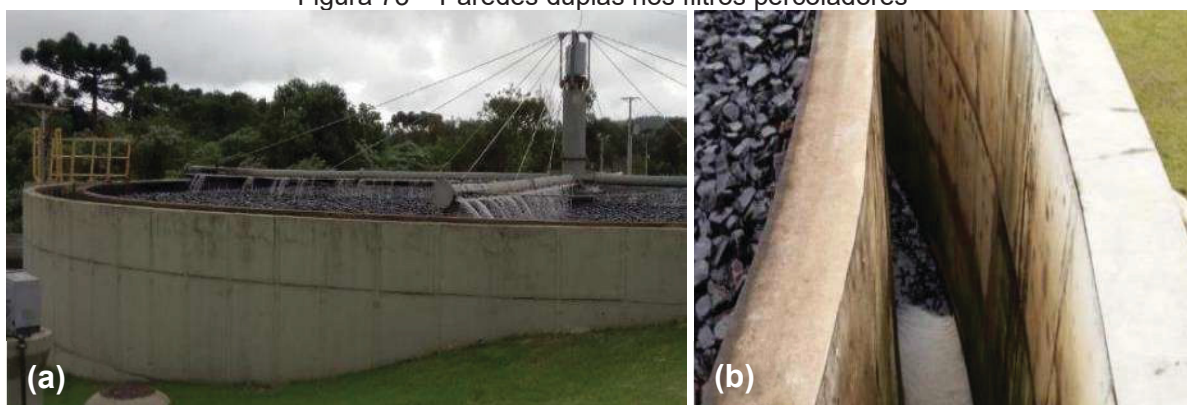
A concepção do filtro com parede dupla nas ETEs do Paraná é justificada ainda pela possibilidade de afogamento do filtro para eventual “lavagem” do meio

suporte e também para que seja possível transformar o filtro percolador em filtro aerado submerso, em etapa futura, se for o caso.

Por esses motivos, e também para manter o padrão dos projetos hidráulico e estrutural, ainda que o filtro fosse semienterrado ou, eventualmente, apoiado, a parede dupla sempre foi mantida nos projetos.

A Figura 73 mostra os filtros percoladores com parede dupla no Paraná. Mesmo sendo semienterrados, a parede externa é construída até a mesma cota da parede interna, mantendo um projeto padrão que atende diferentes situações de terreno e de topografia.

Figura 73 – Paredes duplas nos filtros percoladores



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista parcial de um filtro percolador semienterrado (ETE 18). (b) Detalhe da parede dupla e canal do efluente final (ETE 04).

Por outro lado, na Alemanha, todos os filtros percoladores das ETEs visitadas foram concebidos apoiados, ou seja, com a cota de fundo próxima à cota do terreno. Essa concepção dispensa o uso da parede dupla, não verificada em nenhuma ETE visitada na Alemanha, e exige estrutura adicional para recalque da vazão afluyente ao filtro percolador. Considerando que todas as ETEs visitadas praticam a recirculação do efluente, essa estrutura de recalque do afluyente ao filtro sempre foi considerada na concepção das ETEs, para a vazão afluyente e para a vazão recirculada, verificada a importância da prática de recirculação, conforme discutido no item 4.4.2.19.

Na Figura 74, na Figura 75 e na Figura 76 são mostrados os filtros percoladores visitados na Alemanha, todos apoiados e com as aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à do nível do terreno.



Figura 74 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** A configuração sem parede dupla facilita a troca de ar entre o filtro e o ambiente externo (ETE Sindelfingen).

Figura 75 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** A configuração sem parede dupla facilita a troca de ar entre o filtro e o ambiente externo (ETE Sindelfingen).

Figura 76 – Filtro percolador apoiado, sem parede dupla, com canaleta do efluente final e aberturas para drenagem e aeração natural em cota próxima à cota do terreno



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Canaleta do efluente final na mesma cota do terreno (ETE Neuhausen). (b) No inverno, a canaleta do efluente final é tampada quando neva (ETE Kempten).

Projetistas e especialistas afirmam que há oxigenação suficiente nos filtros percoladores com parede dupla. Por outro lado, considerando que as aberturas no perímetro mais inferior do filtro promovem o arraste de ar e a aeração natural do meio suporte, a partir da diferença de temperatura entre o meio externo e interno, o presente estudo questiona se as paredes duplas são ou não um fator que dificulta o fluxo de ar ou mesmo que limita a quantidade de oxigênio no interior do filtro e, consequentemente, limita a aeração natural. Ainda, o estudo questiona se a concepção utilizada na Alemanha, sem parede dupla e com a cota de saída do efluente final próxima à cota do terreno, pode promover maior fluxo e troca de ar no meio suporte, resultando em maior oxigenação do meio suporte.

Para afirmar a influência da parede dupla e responder a estes questionamentos levantados, seria necessário realizar medições de oxigênio em diferentes temperaturas ao longo de um período tal que fosse possível considerar as variações sazonais, relacionando o fluxo de ar e as temperaturas do ar externa e interna ao filtro com as medições de oxigênio e com as análises de qualidade do efluente. Considerando que a diferença entre as temperaturas interna e externa ao filtro é que definem o fluxo e a troca de ar entre os meios, é importante que as

medições de disponibilidade de oxigênio também sejam acompanhadas de medições de temperatura dentro e fora do filtro.

A concepção dos filtros percoladores apoiados e com estrutura de recalque para a vazão afluyente vai ao encontro da necessidade de realização de recalque para promover a recirculação de parte do efluente do filtro, principalmente quando se objetiva a realização da nitrificação. É importante reiterar que a prática da recirculação possibilita melhor eficiência quanto à remoção de matéria orgânica e quanto à nitrificação, dependendo do dimensionamento e dos objetivos da ETE.

Assim, estabelecer um padrão de projeto que sempre considere a implantação de uma elevatória de recuperação de nível possibilita a recirculação e a manutenção da vazão afluyente ao filtro sempre constante, conforme discutido em diversos itens sobre diferentes aspectos, e possibilita a elaboração de projetos de filtros percoladores sem a parede dupla, independente da topografia do terreno onde será implantada a ETE.

#### 4.4.2.19 Recirculação do efluente dos filtros percoladores

Para a maioria das ETEs analisadas no Paraná, o projeto não contemplou uma elevatória de recalque para recirculação do efluente do filtro. Em algumas ETEs, observou-se que a operação realizou reformas específicas objetivando a flexibilização do fluxograma operacional e a melhoria da qualidade do efluente final com a recirculação.

Dentre as ETEs visitadas no Paraná, algumas realizam recirculação do efluente do filtro percolador nos horários de menor vazão, porém nem sempre de forma combinada, complementando a vazão afluyente à ETE com a vazão de recirculação. O ideal é que parte do efluente do filtro percolador ou do decantador secundário seja recirculado conforme a vazão afluyente à ETE de tal forma que a vazão a ser recirculada complemente a vazão afluyente à ETE visando uma vazão resultante afluyente ao filtro constante ao longo das 24 horas diárias. Ao garantir a vazão afluyente aos filtros constante, essa configuração garante ainda a manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição também constante, refletindo na uniformidade de taxa de aplicação hidráulica, no crescimento adequado do biofilme e na eficiência do tratamento.

Dentre as ETEs visitadas na Alemanha, todas operam com recirculação do efluente do filtro percolador ou do decantador secundário, objetivando melhor qualidade do efluente final. A prática da recirculação do efluente do filtro ou do decantador secundário no filtro proporciona a manutenção da vazão constante, principalmente em horários de menor vazão, evita odores, evita colmatação e mantém o esgoto “fresco”, controla crescimento excessivo do biofilme, controla proliferação de vetores, moscas e caramujos.

Os sistemas de distribuição das ETEs visitadas na Alemanha não possuem motor para manter a velocidade de rotação constante. Em todos os casos, a vazão recirculada contribui para manter constante a vazão afluente ao filtro, fazendo com que a velocidade de rotação do sistema seja também constante, refletindo na distribuição adequada do afluente ao filtro.

Dependendo do dimensionamento do projeto e dos objetivos de remoção de nitrogênio, a recirculação é utilizada para promover a nitrificação nos filtros percoladores, como verificado nas ETEs visitadas na Alemanha.

A partir dos relatos da operação nas ETEs analisadas no Paraná, destaca-se a importância de prever manobras operacionais no projeto da estação, possibilitando a recirculação do efluente do filtro percolador ou do decantador secundário, preferencialmente no próprio filtro.

Ressalta-se que a prática da recirculação representa benefícios como a manutenção do ambiente aerado, vazão afluente ao filtro constante e consequente alimentação da biomassa constante e uniforme, além de fazer com que o tempo de detenção do esgoto em tratamento seja prolongado e que a matéria orgânica recirculada seja portadora de material biologicamente ativado por mais de uma vez, preenchendo o filtro biológico ao longo da profundidade do meio suporte com maior variedade de organismos. Os diversos aspectos positivos da recirculação propiciam a realização de nitrificação parcial ou total, resultando em um efluente que pode ser encaminhado a uma etapa anóxica seguinte, podendo ser, inclusive, filtros percoladores adaptados para uma condição anóxica, agregando a esse processo unitário a possibilidade de atingir alta eficiência de remoção de matéria orgânica, nitrogênio amoniacal e nitrogênio total.



#### 4.4.2.20 Recirculação de lodo

A prática de recirculação de lodo proveniente do decantador secundário nos reatores anaeróbios foi realizada em algumas ETEs visitadas no Paraná. A operação relata dificuldades de sedimentação do lodo recirculado no reator anaeróbio e significativa perda de sólidos no efluente, influenciando negativamente o funcionamento do reator e do filtro percolador, acelerando processos de colmatação em função do aumento do teor de sólidos no afluente ao filtro.

Em função das dificuldades e dos problemas vivenciados, a prática de recirculação do lodo em ETEs com filtros percoladores não é indicada. O lodo retirado do decantador secundário não é recirculado, mas sim descartado e encaminhado para processos de secagem e inertização.

#### 4.4.2.21 Nitrificação e desnitrificação

Nas ETEs do Paraná, a altura útil do meio suporte dos filtros percoladores varia de 1,5 a 3,0 m, operando em regime de alta taxa, com valor mediano de taxa de aplicação hidráulica compatível com filtros de alta taxa, e com cargas orgânicas volumétricas com valores próximos ao limite entre baixa e alta carga, conforme apresentado no item 4.4.2.12, não oferecendo, portanto, condições favoráveis à obtenção da nitrificação.

Dentre as ETEs visitadas no Paraná, em algumas daquelas que praticam a recirculação, os resultados de degradação de DBO e DQO indicam que o tratamento pode alcançar a fase de transição entre as atividades biológicas heterotróficas e autotróficas, sinalizando a possibilidade de realização de nitrificação parcial.

Outras experiências no Brasil, citadas por Chernicharo (2017), também indicam que se tem obtido nitrificação praticando taxas de aplicação hidráulica no limite inferior, de 10 a 12 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d, mantendo a carga orgânica volumétrica entre 0,2 e 0,25 kg/m<sup>3</sup>·d em termos de DBO.

Dentre as ETEs visitadas na Alemanha, na ETE de pequeno porte visitada opera com decantadores primários, filtros percoladores e decantadores secundários. A nitrificação total é obtida nos filtros percoladores com pedra lava e a desnitrificação também é realizada em um filtro percolador com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, nesse caso um filtro específico, adaptado com cobertura, totalmente

vedado, estabelecendo um ambiente anóxico para promover a remoção de nitrogênio total do efluente final.

Já na ETE de médio porte visitada, conforme informado pela equipe de operação e conforme informações obtidas no material gráfico que apresenta os processos unitários da ETE, os filtros com meio suporte plástico estruturado promovem cerca de 90 % de nitrificação e aproximadamente 50 % de desnitrificação. A desnitrificação parcial pode ser obtida nesse caso em função da maior profundidade dos filtros, sendo possível considerar que nas camadas mais inferiores não há oxigênio livre e disponível para manter o ambiente aeróbio, caracterizando então um ambiente anóxico. Ainda, uma parcela do efluente da ETE é encaminhado para tratamento complementar com bactérias *Anammox*, para obter a desnitrificação total e a remoção do nitrogênio.

Por fim, na ETE de grande porte visitada, a nitrificação é realizada nos filtros percoladores, sendo alguns com meio suporte em pedra lava e outros com plástico estruturado. A desnitrificação ocorre em tanques anóxicos específicos a jusante dos filtros percoladores.

Tanto a ETE de médio porte quanto a de grande porte possuem outros processos complementares como lodos ativados, carvão ativado e *Anammox*, dificultando qualquer comparação com o fluxograma das ETEs do Paraná.

Para promover a nitrificação nas ETEs do Paraná, recomenda-se adaptar fluxogramas e layouts para operar os filtros percoladores com recirculação do efluente do filtro ou com filtros percoladores em série, conforme já verificado em algumas ETEs visitadas no Paraná, sendo necessário revisar as taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas praticadas e verificar os cálculos de perda de carga de projeto, bem como realizar as alterações necessárias para implantação de elevatória de recirculação. Ainda, é importante revisar o dimensionamento dos filtros percoladores e verificar se é necessário implantar unidades adicionais ou trocar o meio suporte em brita por plástico estruturado, já que a vazão afluente será a vazão de entrada da ETE somada à vazão recirculada e, conseqüentemente, a taxa de aplicação hidráulica será superior à prevista no projeto original.

Para promover a desnitrificação em filtros percoladores, pode-se utilizar do exemplo da ETE de pequeno porte visitada na Alemanha. Para o caso de uma ETE com dois ou mais filtros percoladores, por exemplo, uma alternativa interessante pode ser substituir o meio suporte de um filtro existente, empregando um material com maior



área superficial específica como o meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, possibilitando a assimilação de maiores cargas hidráulicas e orgânicas para degradação de matéria orgânica e realização de nitrificação.

A mesma adaptação pode ser feita com o outro filtro existente, substituindo também o meio suporte, para aumentar a capacidade hidráulica e de assimilação de carga, e implantando uma cobertura, para proporcionar um ambiente anóxico para realização da desnitrificação.

Para qualquer adaptação em uma ETE existente ou para a implantação de novos filtros, devem ser verificadas as taxas hidráulicas e as cargas orgânicas para que estas sejam compatíveis com os objetivos de tratamento, com o dimensionamento dos filtros e com os materiais empregados como meio suporte.

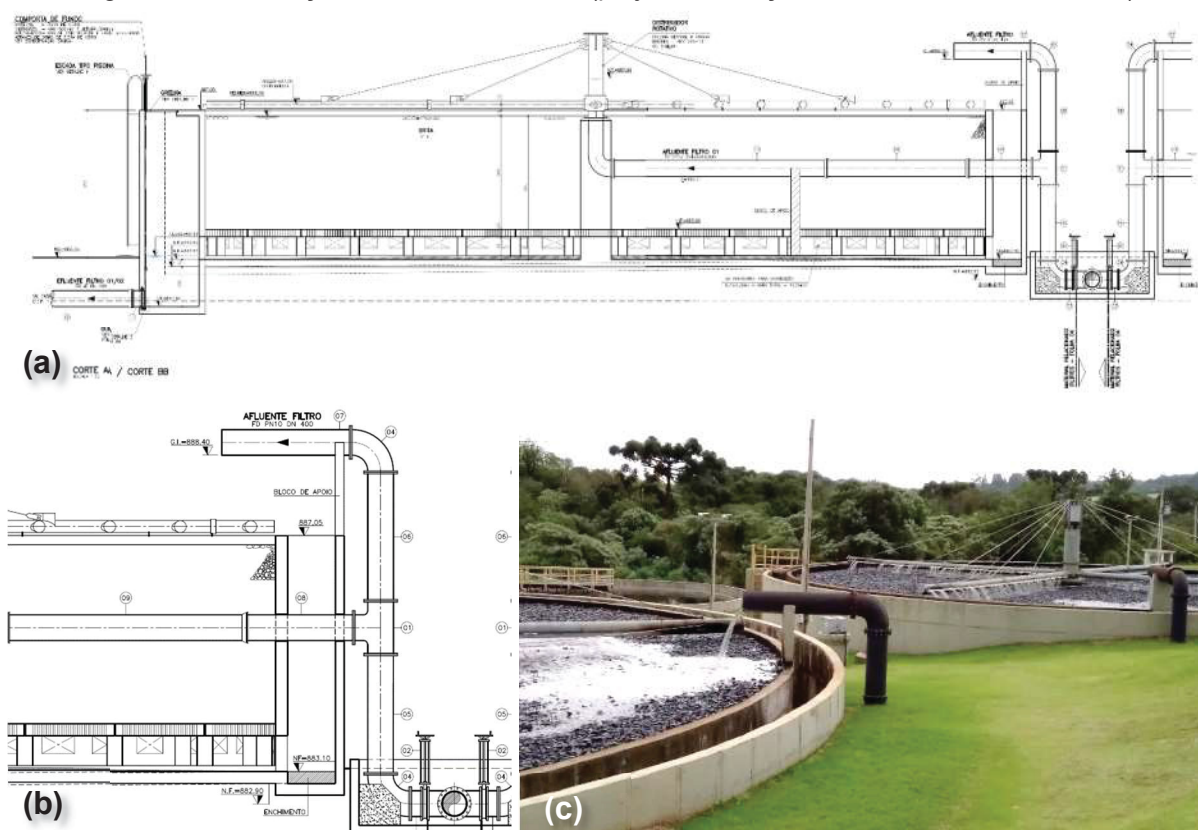
#### 4.4.2.22 Sistema de controle de picos de vazão afluente ao filtro percolador

Em todos os filtros percoladores visitados nas ETEs do Paraná, existe uma tubulação externa ao filtro que pode eventualmente funcionar como um sistema secundário de extravasamento. A vazão excedente afluente ao filtro não é encaminhada para o sistema de distribuição, porém há uma tubulação externa paralela à parede do filtro, cuja extremidade direciona eventual fluxo hidráulico e vazão excedente diretamente no filtro.

Na Figura 77 é possível verificar detalhes de projeto e vista parcial em campo mostrando a tubulação que encaminha a vazão excedente à superfície do filtro. A foto exemplifica a situação de extravasamento da vazão excedente, provocada, nesse caso, excepcionalmente por chuvas de alta intensidade.

Essa configuração de tubulação provoca o afogamento parcial do meio suporte e o alagamento da superfície do meio suporte naquela área, além de prejudicar o biofilme formado, lavando toda a superfície do meio suporte, causando o excessivo desprendimento do biofilme aderido, responsável pelo tratamento biológico, e ocasionando perda de sólidos excessiva no efluente do filtro percolador.

Figura 77 – Tubulação de extravasamento (projeto e situação real com vazão excedente)



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a)(b) Projeto de filtro percolador em corte, com detalhe para a tubulação extravasora. (c) Situação do filtro e da tubulação no momento de extravazão (ETE 18).

Nas estações visitadas na Alemanha, não foi identificado nenhum filtro com essa tubulação externa ao filtro. Como o sistema de esgotamento sanitário municipal na Alemanha recebe esgoto e águas de drenagem pluvial, normalmente os municípios possuem sistemas de contenção e reservação ao longo da rede e até mesmo na própria ETE, permitindo que vazões acima da capacidade da ETE possam ser reservadas e posteriormente tratadas.

Os novos projetos de filtros percoladores devem prever um sistema alívio de pressão hidráulica e de controle de picos de vazão adequado e que não prejudique a operação e o processo de tratamento realizado no filtro percolador.

Recomenda-se não utilizar a tubulação extravasora conforme o exemplo ilustrado na Figura 77, e realizar o controle da vazão excedente em caixa divisora de fluxo a montante do filtro percolador, utilizando comporta vertedora regulada conforme a capacidade dos filtros, para que a vazão afluyente que ultrapassar a capacidade das unidades transborda pela comporta vertedora e seja conduzida a um reservatório de acúmulo ou outra solução.

Para as ETEs existentes, recomenda-se verificar a possibilidade de eliminar essa configuração de tubulação que acaba encaminhando a vazão excedente à superfície do filtro em situações específicas e adequar o sistema de controle de picos de vazão para que vazões excedentes não sejam lançadas na superfície do filtro percolador, prejudicando a distribuição de vazão afluyente no meio suporte e comprometendo o desenvolvimento do biofilme.

#### 4.4.2.23 Odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador

Em função do tratamento anaeróbio que ocorre a montante dos filtros percoladores nas ETEs do Paraná, algumas ETEs apresentam problemas com odores, sendo uma das fontes de dissipação do odor o sistema de distribuição do afluyente do filtro percolador. O cascadeamento que ocorre na distribuição do afluyente ao filtro faz com que gases odoríferos como o  $H_2S$ , dissolvido no efluente do reator anaeróbio, seja desprendido do meio líquido e dissipado na atmosfera, causando problemas de maus odores e corrosão.

Para evitar a dissipação de odores e gases corrosivos, é necessário promover a aeração do efluente do reator anaeróbio, por cascadeamento ou por injeção de ar através de sistema de compressão de ar, e, na sequência, captar, conduzir e tratar os gases desprendidos da fase líquida e dissipados.

Algumas ETEs visitadas no Paraná eliminaram essa fonte de odor no filtro percolador instalando um sistema de aeração a montante dos filtros. Na caixa divisora de fluxo afluyente ao filtro percolador, foi adaptado um sistema de injeção de ar comprimido, provocando o desprendimento dos gases provenientes do tratamento anaeróbio nos reatores. Adicionalmente ao sistema de ar comprimido, junto à caixa divisora de fluxo do afluyente aos filtros foi instalado um sistema de captação e tratamento de gases, composto por tubulação de exaustão e por um filtro biológico.

As adaptações foram realizadas pela operação e a percepção da diminuição de odores foi relatada pela equipe de operação e foi confirmada com a redução de reclamações por parte da população vizinha às ETEs.

Na Figura 78, na Figura 79, na Figura 80 e na Figura 81 são apresentados detalhes da adaptação verificada nas caixas divisoras de fluxo afluyentes aos filtros percoladores e os sistemas de captação e tratamento dos gases.

Figura 78 – Caixa divisora de fluxo e filtro biológico para tratamento de gases



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Vista geral da caixa divisora de fluxo e do sistema de captação e tratamento de gases. (b) Detalhe do filtro biológico para tratamento de gases (ETE 06).

Figura 79 – Aeração na caixa divisora de fluxo e detalhes da tampa de vedação



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Detalhe para a turbulência e bolhas de ar ocasionada pela injeção de ar. (b)(c) Vedação da tampa com borracha e lacre de material não corrosivo (ETE 06).

Figura 80 - Caixa divisora de fluxo e filtro biológico para tratamento de gases



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Nota:** Detalhe para a mangueira de ar comprimido adaptada à caixa divisora de fluxo (ETE 05).



Figura 81 – Detalhe da aerção na caixa divisora de fluxo



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2017).

**Notas:** (a) Detalhe para a turbulência e bolhas de ar ocasionada pela injeção de ar. (b) Detalhe para a tubulação de ar comprimido adaptada (ETE 05).

Outra solução verificada em uma ETE visitada no Paraná foi a realização de uma adaptação da tubulação na caixa divisora de fluxo para promover cascadeamento do afluente, objetivando o desprendimento dos gases. Foi instalado um sistema de captação e tratamento de gases composto por exaustor e filtro biológico, junto à caixa divisora de fluxo, conforme apresentado na Figura 82.

Figura 82 – Cascadeamento para desprendimento de gases na caixa divisora de fluxo e sistema de captação e tratamento de gases



FONTE: Arquivo da Companhia de Saneamento do Paraná (2018).

**Notas:** (a) Detalhe a tubulação elevada para promover o cascadeamento dentro da caixa divisora de fluxo. (b) Sistema de captação e tratamento (ETE 04).

Recomenda-se, assim, considerar sistemas de desprendimento, captação e tratamento de gases corrosivos e odoríferos em todos os projetos de ETEs com filtros percoladores, bem como implantar sistemas adaptados nas ETEs existentes, conforme verificado em algumas ETEs visitadas no Paraná.

Os gases desprendidos são agressivos também ao concreto, sendo, portanto, recomendado proteger a estrutura de concreto contra a corrosão ou utilizar um módulo à parte feito com materiais resistentes à corrosão para promover aeração ou cascadeamento para desprendimento do  $H_2S$  do meio líquido.

#### 4.4.2.24 Crescimento de moscas, insetos, vetores e caramujos

O maior índice de vazios oferecido pelos materiais plásticos pode propiciar ambiente favorável ao desenvolvimento excessivo de caramujos. Na ocorrência de crescimento descontrolado de caramujos, há maior necessidade de manutenção e lavagem e separação desse material do efluente final.

Em uma das ETEs visitadas na Alemanha, a operação relatou que a eficiência dos filtros percoladores com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado foi superior à dos filtros com pedra após a formação e estabilização do biofilme. Ao longo do tempo, porém, foi percebida redução da eficiência dos filtros percoladores com meio suporte plástico, enquanto os filtros com pedra lava mantinham-se com eficiência constante.

Um dos motivos apontados pela operação para a redução de eficiência foi a possibilidade de crescimento excessivo de caramujos nos filtros com plástico estruturado. A operação supõe que o maior índice de vazios e a maior disponibilidade de oxigênio no interior do filtro podem ter propiciado condições mais favoráveis ao crescimento da população de caramujos, que se estabeleceram mais facilmente em profundidades maiores, e que estes, por se alimentarem do biofilme, principalmente as bactérias autotróficas, micro-organismos nitrificantes, acabaram reduzindo a quantidade de biomassa atuante no tratamento, além de diminuir a área superficial específica para fixação do biofilme, diminuindo, assim a eficiência dos filtros com plástico estruturado, principalmente em termos de redução de nitrogênio amoniacal.

Na Figura 83 é possível visualizar uma amostra dos caramujos retirados dos filtros percoladores com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado e as grandes leiras de caramujos separados do efluente dos filtros na área da ETE.



Figura 83 – Caramujos retirados dos filtros percoladores com meio suporte plástico



FONTE: O Autor (2017); Imagem de satélite adaptada do Google Earth (2018).

**Notas:** <sup>(a)</sup> Detalhe dos caramujos retirados dos filtros percoladores. <sup>(b)</sup> Armazenamento provisório de caramujos em leiras (ETE *Sindelfingen*).

Visando prevenir futuros problemas relacionados à presença de caramujos, principalmente nos novos filtros com meio suporte plástico, devem ser realizados estudos adicionais, buscando experiência em escala operacional em outras estações em operação.

As taxas de aplicação hidráulica devem ser testadas para que não ocorra a proliferação de caramujos, principalmente em baixa taxa. Caso seja percebida a presença de caramujos em excesso, podem ser adotadas as recomendações de literatura, conforme resumido no item 2.5.2.18.

#### 4.4.3 Processos unitários a jusante do filtro percolador

##### 4.4.3.1 ETEs analisadas e visitadas no Paraná

Após os filtros percoladores, todas as ETEs analisadas e visitadas no Paraná possuem decantador secundário, com exceção de uma ETE.

As taxas de aplicação superficial dos decantadores secundários verificadas nas ETEs no Paraná variam de 5,5 a 39,1  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , sendo a mediana igual a 12,1  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , considerando valores medianos a partir dos registros de vazão realizados disponíveis referentes a 2017. Valores inferiores a 16  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  não estariam de acordo com o que recomenda a literatura. Valores entre 16 e 32  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  são recomendados para filtros que objetivam apenas a degradação da matéria orgânica, enquanto valores entre 16 e 24  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$  são recomendados para filtros que objetivam a nitrificação. Sendo a mediana estimada em 12,1  $\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$ , pode-se apontar que mais da metade das ETEs com filtros percoladores no Paraná operam os decantadores

secundários com taxas inferiores às recomendações de literatura e que, por outro lado, uma pequena parcela opera com valores acima do recomendado. Ambas situações podem indicar necessidade de revisão das taxas de aplicação superficial dos decantadores atualmente praticadas nas ETEs.

Considerando os dados analisados nesse estudo, em algumas ETEs no Paraná foi verificado que o efluente do decantador secundário apresentou concentrações de DBO ou DQO superiores às do efluente do filtro percolador, indicando que pode haver problemas de dimensionamento ou de operação nos decantadores secundários. Esses exemplos reforçam a afirmação de WEF (2011) e de Metcalf & Eddy (2016) de que em muitos casos os problemas ou as desvantagens apontadas para sistemas com filtros percoladores estão na verdade associadas a problemas nas etapas de projeto, implantação, operação ou manutenção nos demais processos unitários a montante ou a jusante dos filtros, prejudicando o funcionamento dos filtros percoladores e a eficiência da ETE.

Quanto à operação de uma ETE com filtros percoladores sem etapa de decantação secundária, um estudo mais aprofundado com levantamento da caracterização do afluente e do efluente de todos os processos unitários, incluindo reatores anaeróbios, filtros percoladores e decantadores secundários, bem como com monitoramento da vazão afluente e da taxa de aplicação hidráulica e variações, poderia resultar em recomendações relacionadas à implantação de filtros percoladores sem etapa de decantação secundária ou implantação de decantadores secundários apenas em etapa futura, quando houver necessidade de estabelecer metas progressivas para melhoria do efluente.

Considerando a obtenção de bons resultados sem decantador secundário observado em uma das ETEs visitadas no Paraná; considerando que em algumas ETEs analisadas o efluente do filtro percolador apresenta concentração de DBO inferior à concentração do efluente do decantador secundário; e, por fim, considerando as afirmações de literatura verificadas na prática de que problemas nos demais processos unitários prejudicam ou mesmo comprometem o funcionamento dos filtros percoladores ou a qualidade do efluente final, outro estudo dedicado poderia abordar a verificação das dimensões dos decantadores secundários em operação nas demais ETEs e a validação ou revisão dos métodos de dimensionamento da etapa de decantação secundária, a fim de que a etapa de decantação secundária do tratamento represente ganho significativo da qualidade do efluente final.

#### 4.4.3.2 ETEs analisadas e visitadas no Sul da Alemanha

Dentre as ETEs visitadas na Alemanha, as ETEs de médio e grande porte possuem mais processos unitários a jusante dos filtros percoladores, como sistema de lodos ativados convencional com desnitrificação a montante, tanque anóxico para desnitrificação, processo de adsorção com carvão ativado, filtro de areia e antracito e tanque para o processo *Anammox*. Os detalhes do fluxograma dessas ETEs podem ser verificados nos itens 4.5.2.1 e 4.5.2.2.

Já a ETE de pequeno porte é composta por decantação primária, filtros percoladores e decantação secundária a jusante dos filtros percoladores, conforme descrição detalhada no item 4.5.2.3.

### 4.5 RESUMO DOS PRINCIPAIS DADOS E CARACTERÍSTICAS DAS ETES ANALISADAS E VISITADAS

#### 4.5.1 ETEs no Paraná

Ao levantar as principais características e dados das estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores visitadas no Paraná, foi elaborado um quadro resumo contendo informações de todos os processos unitários, incluindo dimensões das unidades e outros dados de projeto, tipo de meio suporte, taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas, calculadas ou estimadas, entre outros detalhes de operação e manutenção. O quadro resumo está apresentado no Apêndice B.

#### 4.5.2 ETEs no Sul da Alemanha

Quanto às ETEs visitadas no Sul da Alemanha, considerando a variedade de processos e também de dados obtidos, uma descrição resumida do fluxograma e de outras peculiaridades das ETEs visitadas está apresentada nos itens 4.5.2.1 a 4.5.2.3.

##### 4.5.2.1 ETE *Kempton*

A ETE *Kempton* está localizada no município de mesmo nome, no Estado de *Bayern*, Alemanha, e teve sua operação iniciada em 1986. A região de *Kempton*

apresenta clima temperado, com temperaturas máximas e mínimas médias iguais a 21,5 °C e -6,2 °C, e a média anual igual a 6,9 °C.

A ETE *Kempton* recebe entre 400 e 580 l/s em tempo seco e cerca de 2.300 l/s em tempo chuvoso, e atende o município de *Kempton* e outros municípios e localidades. O esgoto tem características predominantemente domésticas, mas recebe ainda águas pluviais do sistema de drenagem urbana e efluente de indústrias, predominantemente fabricação de queijos e outros derivados de leite.

O sistema de tratamento preliminar da ETE *Kempton* é composto por seis equipamentos de gradeamento mecanizado de 6 mm, duas linhas de caixa de areia aerada com capacidade para retenção de 300 kg/d, e sistemas de desaguamento, lavagem da areia, transporte dos resíduos e caçambas.

Na sequência, o tratamento primário é realizado através de decantadores primários de profundidade igual a 2,2 m, comprimento igual a 66,0 m e volume igual a 1.540 m<sup>3</sup> cada.

A ETE *Kempton* passou por ampliações ao longo dos anos e, por este motivo teve algumas unidades complementares implantadas e o fluxograma adaptado. Após a decantação primária, a ETE dispõe de dois tanques anóxicos de 2,9 m de profundidade e capacidade líquida de 5.500 m<sup>3</sup> para desnitrificação a montante. Esses tanques promovem a degradação de 4,0 t/d de DBO e realizam a precipitação simultânea do fósforo a partir da adição de sais metálicos.

O efluente é encaminhado para dois tanques de lodos ativados, com volume total igual a 4.000 m<sup>3</sup> e capacidade de 10.000 m<sup>3</sup>/h, onde ocorre a degradação de carbono com processo aeróbio, com fornecimento de 1.200 kg/h de O<sub>2</sub>.

Entre o sistema de lodos ativados e os filtros percoladores, há ainda dois tanques intermediários com capacidade de 7.500 m<sup>3</sup> e que ocupam uma área de 1.400 m<sup>2</sup> cada, para uma etapa de decantação intermediária.

Na sequência, 2 filtros percoladores de 4.000 m<sup>3</sup> recebem o efluente do decantador intermediário para realização de nitrificação. Um terceiro filtro percolador do mesmo volume é utilizado para tratamento com qualidade suficiente para fornecimento de água de reuso para a ETE.

Anteriormente, os 3 filtros realizavam a fase biológica de tratamento do esgoto. Com a substituição do meio suporte de pedra lava para plástico estruturado de fluxo cruzado, essa configuração foi adaptada. A substituição do meio suporte objetivou o ganho de superfície específica e o aumento da capacidade e da eficiência

do tratamento da ETE. O material retirado foi disposto em local controlado, com drenagem que encaminhava a vazão de lavagem das pedras pelas chuvas para o sistema de entrada da ETE. Após inertizado, o material está sendo utilizado na própria ETE para fins de jardinagem e base para pavimentação de novos pátios.

O meio suporte plástico adotado para os filtros possui área superficial específica igual a  $200 \text{ m}^2/\text{m}^3$ . Os filtros recebem  $100.000 \text{ m}^3/\text{d}$  com  $1.700 \text{ kg/d}$  de NTK, sendo  $1.150 \text{ kg/d}$  de  $\text{NH}_4^+$ . Parte da vazão efluente aos filtros percoladores é recirculada para a desnitrificação a montante e parte para o próprio filtro percolador. A eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal nos filtros é de 90 % e a desnitrificação ocorre em 50 % do volume tratado. A vazão de recirculação é utilizada também para manter a velocidade do sistema de distribuição constante.

A Tabela 25 apresenta os dados de afluente e efluente dos filtros percoladores da ETE *Kempton*.

Tabela 25 – Dados de afluente e efluente dos filtros percoladores da ETE *Kempton*

$Q_{\text{media}}$ (l/s)	Afluente	Efluente
1.168,8	Filtro percolador	Filtro percolador
DBO (mg/l)	<b>37,9</b>	<b>11,8</b>
DQO (mg/l)	<b>78,4</b>	<b>40,3</b>
Namoniacal	<b>10,3</b>	<b>1,1</b>
$\text{NO}_2$	<b>0,06</b>	<b>0,24</b>
$\text{NO}_3$	<b>0,5</b>	<b>10,6</b>
$\text{P}_{\text{total}}$	<b>1,1</b>	<b>0,6</b>

FONTE: *Kempton* Abwasser (2017).

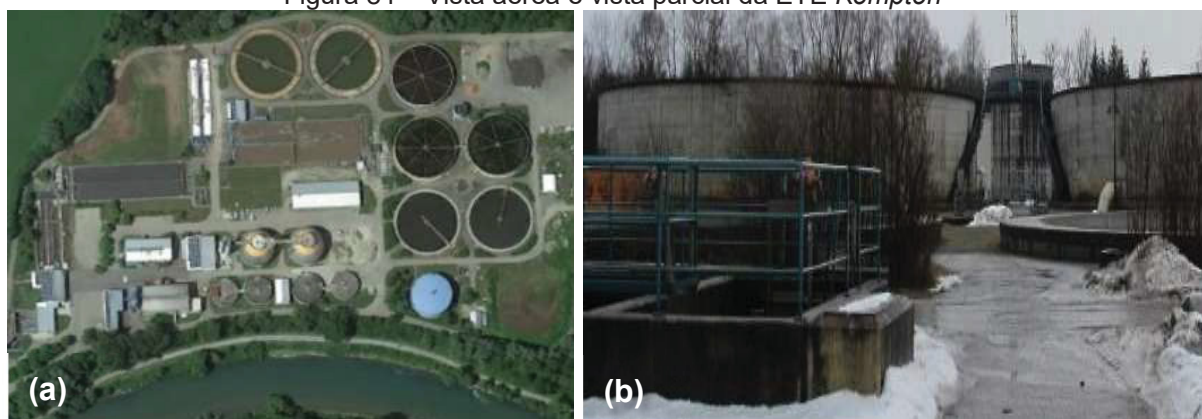
**Notas:** <sup>(ND)</sup> Dado não disponível.

Após o filtro percolador, o efluente segue para a decantação secundária, realizada em dois tanques de  $2.700 \text{ m}^3$ , para depois ser lançado no corpo receptor, o Rio *Iller*.

A Figura 84 mostra o layout geral da ETE *Kempton* e o corpo receptor Rio *Iller*. Já na Figura 85, é possível verificar o sistema de distribuição com 8 braços, em aço inox, movido apenas pela força hidráulica, e o meio suporte plástico adotado.



Figura 84 – Vista aérea e vista parcial da ETE *Kempton*



FONTE: Adaptado de Google Earth (2017); Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista aérea. (b) Vista parcial dos filtros percoladores (ETE *Kempton*).

Figura 85 – Vista parcial da superfície do filtro percolador



FONTE: Arquivo do Autor (2017).

**Nota:** O sistema de distribuição possui 8 braços e o meio suporte plástico estruturado havia sido recentemente implantado, em substituição ao meio suporte em pedra lava (ETE *Kempton*).

O lodo primário gerado na decantação primária é encaminhado para digestão anaeróbia. Já para o lodo proveniente dos decantadores intermediários, enquanto uma parcela segue para a digestão, outra parcela retorna para a entrada do tanque de desnitrificação a montante para recirculação. O lodo proveniente dos decantadores secundários é misturado com a percentagem do efluente dos filtros percoladores, que também é recirculada para o tanque de desnitrificação a montante.

O lodo digerido gera biogás suficiente para suprir 86 % da demanda energética da ETE, sendo comprado da companhia de energia apenas 14 % da energia utilizada em toda a ETE. A prática de geração de energia e autonomia energética da ordem de 60 % é comum nas ETEs na Alemanha, sendo verificada nessa ETE, portanto, um aproveitamento acima da média verificada em campo nas ETEs visitadas.



A ETE conta ainda com o processo *Anammox* para oxidação anaeróbia do nitrogênio amoniacal. Este módulo de tratamento opera em escala reduzida e não recebe, portanto, a vazão total da ETE, pois está em fase inicial de operação, tendo apresentado bons resultados segundo a equipe de operação. A operação confirmou que um dos principais motivos para este processo estar em escala reduzida é a sensibilidade do sistema às condições de temperatura, pH e concentração do afluente, sendo necessário controle automatizado do sistema e monitoramento 24 h rigoroso para garantir a operação adequada.

A ETE possui uma sala com sistemas de monitoramento para controlar todos os processos unitários e equipamentos, incluindo sistema de alarmes para indicar qualquer irregularidade operacional na ETE, nas estruturas de recalque e na rede coletora, detectando, inclusive, o lançamento de substâncias atípicas ou perigosas na rede, por exemplo. Além do monitoramento central, são realizadas as análises laboratoriais para atendimento dos requisitos legais de auto monitoramento prescrito e para obter controle operacional quanto à eficiência de todas as etapas de tratamento que compõem a ETE.

#### 4.5.2.2 ETE *Böblingen-Sindelfingen*

A ETE *Böblingen-Sindelfingen* atende a população residente nos municípios de *Böblingen* e de *Sindelfingen*, na região de *Stuttgart*. O esgoto é composto por parcela doméstica, comercial, industrial e drenagem urbana.

Para a retenção de sólidos grosseiros, a ETE possui gradeamento mecanizado de 5 mm. A geração de resíduos provenientes do gradeamento é de 320 t/ano. Na sequência, a retenção de areia e gordura é feita por meio de um sistema de desarenador aerado com capacidade líquida igual a 970 m<sup>3</sup>. O tempo de detenção em tempo seco é de 40 a 45 minutos e em tempo chuvoso, 8 a 10 minutos. Por ano, é retirado cerca de 235 t de areia. Toda a areia retirada passa por processo de lavagem e é reutilizada na construção civil, sendo esta prática de lavagem e reaproveitamento da areia comum nas ETEs da Alemanha.

A ETE possui 6 decantadores primários de 77.300 m<sup>3</sup> com tempo de detenção hidráulica de 5 h em tempo seco e 1 h em tempo chuvoso. Diariamente, cerca de 85 m<sup>3</sup> de lodo primário a 7,5 % de sólidos é produzido nessa etapa de tratamento.

Na sequência, 7 filtros percoladores de profundidade igual a 5 m, sendo 2 com 28 m de diâmetro e os outros 5 com 42 m de diâmetro, totalizando 30.000 m<sup>3</sup> de volume útil, realizam a degradação de carbono e a remoção de nitrogênio amoniacal.

Os primeiros 3 filtros percoladores foram implantados em 1962. A ETE passou por várias ampliações e melhorias, sendo que em 1973 foram implantados mais 3 filtros percoladores e em 1982, mais 2 filtros foram implantados

Na Figura 86 é possível verificar uma vista aérea e uma vista parcial da ETE *Sindelfingen* e de um dos filtros percoladores.

Figura 86 – Vista aérea e vista parcial da ETE *Sindelfingen*



FONTE: Adaptado de Google Earth (2017); Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista aérea da ETE *Sindelfingen*. (b) Vista parcial da ETE e de um dos filtros percoladores.

Após os filtros percoladores, o efluente vai para um tanque anóxico de 2.700 m<sup>3</sup> para desnitrificação, com cerca de 1 h de detenção. Nesta etapa ocorre adição de metanol para repor a quantidade necessária para a etapa de desnitrificação em meio anóxico.

A ETE possui ainda uma etapa de remoção de fósforo por precipitação química, operada desde 1989; 4 decantadores secundários, totalizando 22.250 m<sup>3</sup>, sendo o ponto mais fundo do tanque com 8,2 m, com tempo de detenção hidráulica de 16 h em tempo seco e 3 h em tempo chuvoso; 16 filtros de areia de fluxo descendente, objetivando a retenção de flocos mais finos que não decantaram na etapa de decantação secundária e de fósforo aderido aos sólidos, sendo retidos cerca de 21 kg/d de fósforo.

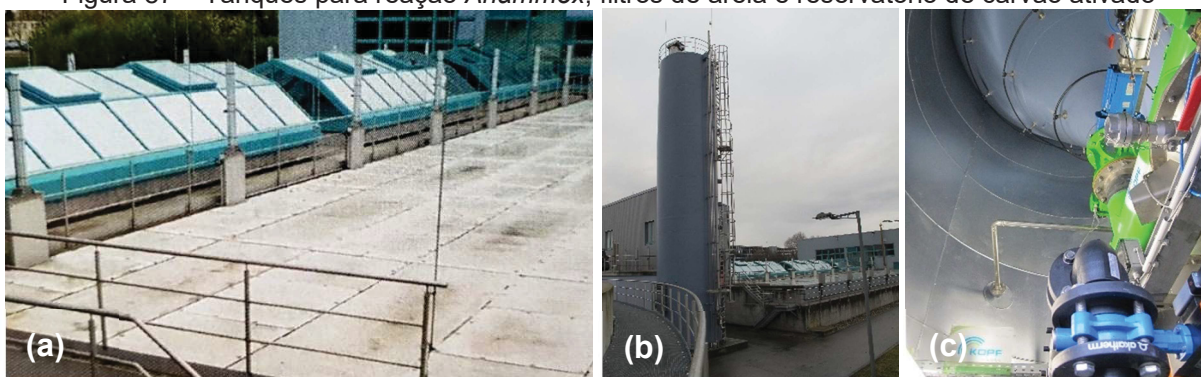
Por fim, o efluente passa por um tanque de 7.200 m<sup>3</sup> onde ocorre o polimento do efluente com carvão ativado, etapa implantada mais recentemente, em 2011. O

tempo de contato entre o efluente e o carvão ativado no tanque é de 5 h em tempo seco e 2,5 h em tempo chuvoso.

Em etapa de escala reduzida, recebendo apenas parte da vazão total do efluente final da ETE, mais dois processos de polimento estão em operação. São 16 filtros de areia e antracito, totalizando 37,5 m<sup>3</sup> e um tanque de reação de nitrificação e desnitrificação pelo processo de nitrificação anaeróbia *Anammox*.

Na Figura 87 são mostrados o tanque *Anammox*, os filtros de areia e o silo de armazenamento de carvão ativado.

Figura 87 – Tanques para reação *Anammox*, filtros de areia e reservatório de carvão ativado



FORNTE: Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Tanques *Anammox* e filtros de areia. (b)(c) Reservatório de carvão ativado.

Na Tabela 26 estão apresentados os valores medianos para afluente e efluente da ETE *Sindelfingen*.

Tabela 26 – Dados de afluente e efluente da ETE <i>Sindelfingen</i>		
Q <sub>media</sub> (l/s)	Afluente	Efluente
405		
DQO (mg/l)	<b>546</b>	<b>20</b>
N <sub>amoniaco</sub>	<b>33,9</b>	<b>0,7</b>
NO <sub>2</sub>	(ND)	<b>0,1</b>
NO <sub>3</sub>	<b>0,8</b>	<b>8,5</b>
N <sub>total</sub>	<b>52,5</b>	<b>11,0</b>
Fósforo	<b>8,1</b>	<b>0,2</b>

FORNTE: *Böblingen-Sindelfingen Abwasser* (2017).

**Nota:** (ND) Dado não disponível.

#### 4.5.2.3 ETE *Neuhausen*

A ETE *Neuhausen* é composta por sistema preliminar com gradeamento mecanizado de 6 mm e desarenador de fluxo horizontal, decantação primária, 5 filtros percoladores e 2 decantadores secundários.

Por receber vazão de drenagem urbana, assim como as demais ETEs visitadas na Alemanha, a vazão afluente à ETE varia conforme as precipitações de tal forma que em tempo seco, a vazão é de aproximadamente 30 l/s e em períodos chuvosos chega a 157 l/s, representando uma variação significativa e a necessidade de um sistema de redes e de tratamento robusto e adaptável.

Ao longo da rede coletora de esgoto e águas pluviais, de aproximadamente 40 km, existem 8 bacias de contenção para águas pluviais, além das várias estações elevatórias. As bacias de contenção equalizam a vazão afluente à ETE, reduzindo o impacto sobre o sistema de tratamento.

A ETE foi projetada para atender 15.000 habitantes equivalentes. A etapa de tratamento biológico, ou seja, os filtros percoladores, apresentam volume tal que possibilita a recirculação de até 4 vezes a vazão média afluente em tempo seco. Já em tempo chuvoso, o sistema de coleta equaliza a vazão afluente, com concentrações significativamente menores afluente à ETE.

O sistema de filtros percoladores foi dimensionado para realizar nitrificação e desnitrificação, sendo 4 filtros percoladores tradicionais, com operação aeróbia, para degradação de matéria orgânica e para nitrificação, e 1 filtro percolador com cobertura, totalmente vedado para promover ambiente anóxico, para realizar a desnitrificação.

Os quatro filtros para nitrificação somam uma área superficial de 600 m<sup>2</sup>, sendo todos de altura igual a 3,5 m, totalizando um volume de 2.100 m<sup>3</sup>, com meio suporte em pedra lava, com área superficial específica estimada em 90 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>. Já o quinto filtro percolador, coberto e totalmente vedado para criar um ambiente anóxico, possui 200 m<sup>2</sup> de superfície e 3,5 m de altura, perfazendo um volume de 700 m<sup>3</sup>, com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado, com área superficial específica igual a 150 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>.

A partir das dimensões dos filtros, das vazões mínimas e máximas, registradas em tempo seco e em tempo chuvoso, e da carga orgânica afluente aos filtros, as taxas de aplicação hidráulica foram estimadas entre 4,3 e 22,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d nos filtros que promovem a nitrificação, em tempo seco e em tempo chuvoso, respectivamente, sendo a mediana estimada em 12,9 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d; e entre 12,9 e 67,8 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d no filtro que promove a desnitrificação, em tempo seco e em tempo chuvoso, respectivamente, sendo a mediana estimada em 38,6 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>·d. Todas as



taxas verificadas são compatíveis com as recomendadas em literatura, para os objetivos do filtro e para os materiais empregados.

Na Figura 88 é possível verificar a vista aérea da ETE e uma vista parcial dos filtros percoladores. O filtro com cobertura vermelha é o filtro para desnitrificação, totalmente vedado. Já o filtro com cobertura verde opera normalmente para nitrificação e, segundo a equipe de operação, foi instalada uma cobertura para evitar a proliferação de moscas, já que este filtro está próximo ao escritório da ETE.

Figura 88 – Vista aérea e vista parcial da ETE Neuhausen



FONTE: Adaptado de Google Earth (2017); Arquivo do Autor (2017).

**Notas:** (a) Vista aérea da ETE Neuhausen. (b) Vista parcial dos filtros percoladores.

Na Tabela 27 estão apresentados os dados de eficiência da ETE Neuhausen, considerando valores medianos.

Tabela 27 – Dados de afluente e efluente da ETE Neuhausen				
Q <sub>mediana</sub> (l/s)	Afluente	Efluente		
89,4		Decantador primário	Filtro percolador	Decantador secundário
DQO (mg/l)	470,0	276,5	135,0	14,8
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	30,3	28,2	8,9	0,9
NO <sub>3</sub>	4,4	(ND)	4,9	11,0
NO <sub>2</sub>	(ND)	(ND)	(ND)	0,2
N <sub>total</sub>	49,0	41,0	(ND)	12,2
P <sub>total</sub>	6,1	4,1	(ND)	0,4

FONTE: Neuhausen Abwasser (2017).

**Nota:** (ND) Dado não disponível.

## 4.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE AS EXPERIÊNCIAS OBSERVADAS NAS ETES VISITADAS NO BRASIL E NA ALEMANHA

### 4.6.1 Diferentes características do esgoto afluyente

A principal diferença da composição do afluyente está relacionada ao sistema misto verificado na Alemanha, que recebe esgoto e águas de drenagem urbana na ETE, obtendo um afluyente mais diluído se comparado ao afluyente característico verificado nas ETES no Paraná.

Outra diferença está relacionada aos resíduos sólidos lançados no sistema de esgoto. Na Alemanha, o papel higiênico e outros resíduos são descartados na tubulação de esgoto. Considerando tais hábitos e considerando também o gradeamento mais fino utilizado na Alemanha, que possibilita a retenção de sólidos menores, a tendência é que a quantidade de resíduos retidos na etapa de gradeamento nas ETES da Alemanha seja superior à verificada no Paraná.

As tubulações ou ramais individuais das residências na Alemanha não são sempre de diâmetro maior que as utilizadas no Paraná. Em muitos locais, utiliza-se também DN100, assim como no Brasil. A diferença é que o sistema misto na Alemanha exige redes, coletores e interceptores de diâmetros maiores e galerias, já que os sistemas de coleta devem suportar as vazões de esgoto somadas às vazões de drenagem urbana. Os entupimentos são evitados em função do maior diâmetro das redes e galerias e da vazão pluvial periódica, que acaba promovendo uma lavagem das tubulações e galerias.

### 4.6.2 Processos unitários e tecnologias de tratamento de esgoto utilizadas

As ETES de médio e grande porte visitadas na Alemanha possuem mais processos unitários se comparadas às ETES do Paraná. Uma comparação entre fluxogramas das ETES do Paraná, com reatores anaeróbios, filtros percoladores e decantadores secundários foi possível, portanto, apenas com a ETE de pequeno porte que possui decantadores primários, filtros percoladores e decantadores secundários.

As ETES de médio e grande porte visitadas na Alemanha são compostas por outros processos adicionais, incluindo lodos ativados, decantadores intermediários, filtros de areia, antracito e carvão ativado e ainda processo *Anammox*. O fato de as ETES de maior porte possuírem mais processos unitários está diretamente



relacionado à legislação alemã que exige maior qualidade do efluente final conforme o porte da ETE, conforme apresentado no item 2.3.2.

A DQO mediana anual afluente das ETEs no Paraná variou de 500 a 1.259 mg/l, enquanto a DQO mediana afluente da ETE de pequeno porte foi de 468 mg/l. Para o efluente final, a DQO mediana das ETEs no Paraná está entre 104 e 126 mg/l, enquanto na ETE visitada na Alemanha, a DQO média efluente é de 15,2 mg/l.

A concentração de nitrogênio amoniacal do efluente final nas ETEs visitadas no Paraná variou entre 38,9 e 53,3 mg/l, enquanto na ETE de pequeno porte visitada na Alemanha, a mediana do efluente final foi de 1,2 mg/l. Cabe ressaltar que o objetivo das ETEs no Paraná ainda não é a nitrificação, enquanto na Alemanha, o objetivo da ETE visitada é a nitrificação e a desnitrificação do efluente.

Reitera-se que a ETE de pequeno porte visitada na Alemanha foi utilizada nesse estudo como um exemplo significativo em relação às ETEs no Paraná em função de um fluxograma de processo simplificado, com semelhanças em relação ao que é utilizado nas ETEs analisadas no Paraná, e que atinge elevada qualidade do efluente final.

#### 4.6.3 Qualidade do efluente final, eficiências obtidas e a relação com as exigências legais e ambientais

O lançamento de efluentes tratados no Estado do Paraná é regulado pela licença ambiental do empreendimento e pela Outorga de Direito ao uso de corpos hídricos para diluição de efluentes. As resoluções federais e estaduais apresentam limites para os parâmetros de qualidade da água, mas os documentos ambientais de licença e outorga podem ser mais restritivos, conforme o empreendimento e conforme a capacidade de diluição do corpo receptor.

Normalmente é dado limite para a concentração de DBO, DQO e sólidos. A concentração de nitrogênio amoniacal não é cobrada atualmente para sistemas de tratamento de esgoto sanitário, conforme estabelecido na Resolução CONAMA nº 430 (2011), sendo a cobrança deste parâmetro uma possibilidade atualmente em discussão. Apenas em alguns casos específicos a remoção de nitrogênio e fósforo é exigida, principalmente quando o corpo receptor ou o corpo hídrico a jusante é de regime hidráulico lântico, sujeito à eutrofização.

No Paraná, a frequência de resultados a serem disponibilizados à fiscalização para verificar o cumprimento da qualidade do efluente final exigida na licença e na outorga é variada conforme o porte da ETE, podendo ser quinzenal a trimestral. Os órgãos fiscalizadores e os documentos legais, porém, exigem que em 100 % do tempo o efluente final esteja em conformidade com os limites estabelecidos.

Na Alemanha, a fiscalização é de frequência mais constante e todos os dados de análise em tempo real, com frequência diária, devem ser entregues ao órgão fiscalizador. Os operadores descrevem os órgãos ambientais fiscalizadores como muito rígidos e presentes. A qualquer momento, fiscais ambientais podem visitar as estações e solicitar o monitoramento de dados, realizando ainda coletas nas unidades de tratamento e nos sistemas de coleta automatizados para verificações e para comparação com os dados fornecidos.

Na Alemanha, há limites para nitrogênio e fósforo, porém há exceção de cobrança quanto à nitrificação nos meses de inverno, considerando que as temperaturas mais baixas afetam as atividades biológicas que ocorrem durante os processos de tratamento. Ainda assim, os limites mínimos estabelecidos em nível federal são mais restritivos se comparados às resoluções federal e estadual do Paraná para DQO e DBO para estações de tratamento de esgoto.

#### 4.6.4 Estrutura organizacional de empresas prestadoras de serviço de coleta e tratamento de esgoto no Paraná e na Alemanha

As estruturas organizacionais das empresas que prestam serviços de coleta e tratamento de esgoto são bastante distintas no Brasil e na Alemanha. As considerações são aqui apresentadas justamente por indicar diferenças significativas quanto ao planejamento e à administração dos empreendimentos e quanto à disponibilidade de recursos para investimento, refletindo diretamente na estrutura disponível para operação dos sistemas e na qualidade dos serviços oferecidos.

Enquanto no Paraná uma única empresa atende cerca de 85 % dos municípios do Estado, na Alemanha as empresas são descentralizadas e operam apenas o sistema de um município ou de municípios próximos associados.

Na Alemanha, não necessariamente a empresa que opera o sistema de abastecimento de água é a mesma empresa que opera o sistema de drenagem urbana e de coleta e tratamento de esgoto. As empresas normalmente não têm fins lucrativos

e os recursos para a operação são obtidos através da tarifa repassada à população e, eventualmente, de forma programada, quando há investimentos de maior porte, por meio de recursos federais para desenvolvimento do setor.

Enquanto uma empresa centralizadora dos serviços de água e esgoto atende um estado com municípios de diferentes portes e aplica uma tarifa calculada com lógica de subsídio cruzado, modelo predominante no Paraná e no Brasil, uma empresa descentralizada define a tarifa do serviço de acordo com um planejamento de custos, incluindo investimentos, custos operacionais e de manutenção, com revisões anuais, modelo verificado nas ETEs visitadas no Sul da Alemanha.

A composição de tarifa em uma empresa de serviços de saneamento que utiliza a lógica de subsídio cruzado revela o carácter social e ambiental que deve estar intrínseco a este setor. Essa lógica de administração cruzada dos recursos é concebida de tal forma que municípios maiores, que possuem receita superior aos custos do sistema, subsidiam o funcionamento dos sistemas nos municípios menores, que não gerariam por si só receita suficiente para suprir os próprios custos de implantação e operação. Esta lógica é praticada para que seja possível oferecer os serviços de saneamento localidades que não apresentam viabilidade financeira.

Sabendo que o setor do saneamento é essencial para a saúde pública, para a qualidade de vida e para a preservação do meio ambiente e dos recursos hídricos, a lógica de subsídio cruzado é importante, sobretudo em países em desenvolvimento e que buscam a universalização dos serviços.

No Paraná, todos os municípios atendidos pela Companhia pagam o mesmo valor por metro cúbico de água distribuída. Um percentual adicional a esse valor é cobrado quando é oferecido o serviço de coleta e tratamento de esgoto, a partir do coeficiente de retorno, sempre relacionado à tarifa da água e sempre inferior a 1. Ainda, há a tarifa social, diferenciada e oferecida a famílias de baixa renda, sendo esta mais uma característica de sistema de cobrança que vai ao encontro da meta de universalização do saneamento.

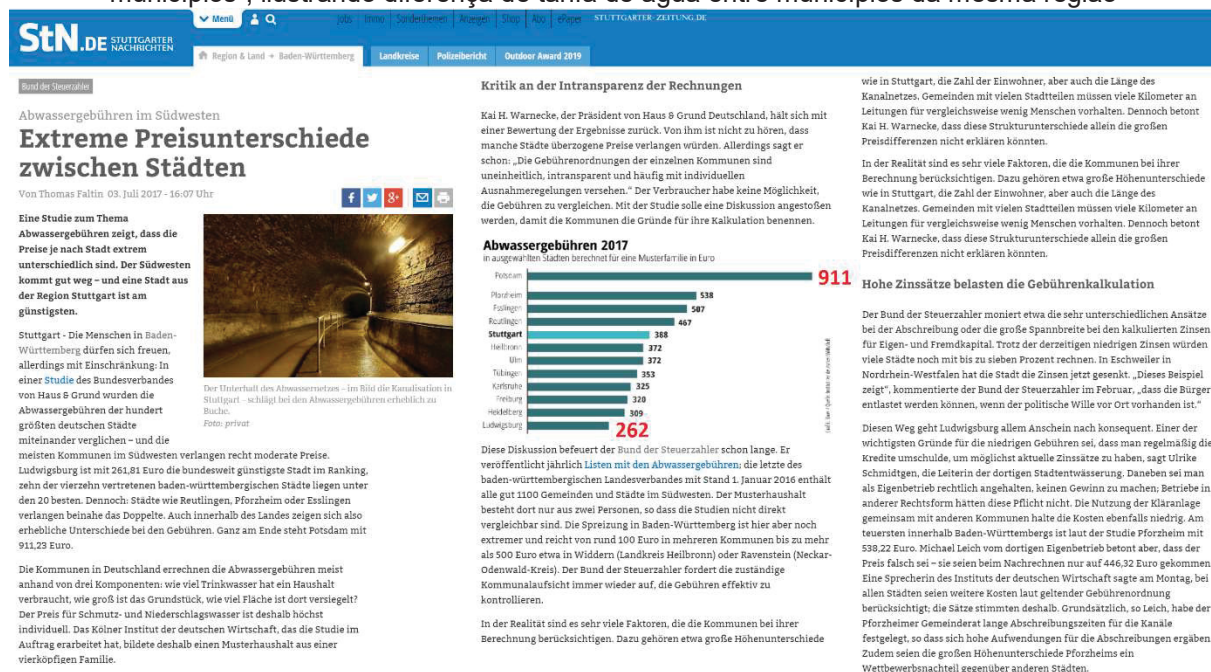
A valoração da tarifa de esgoto em função da tarifa de água não é adequada quando se verifica que mundialmente o tratamento de esgoto é sempre mais oneroso se comparado aos processos de tratamento de água, sendo necessário revisar, adequar e modernizar o método de definição de tarifa de esgoto no Brasil.

Já as tarifas praticadas nos sistemas descentralizados e independentes visitados no Sul da Alemanha são compostas de acordo com o que o sistema

demanda de investimento para operar e atender à população e às exigências ambientais. O sistema descentralizado gera naturalmente diferenças significativas de valores de tarifa de água e de esgoto entre os municípios, já que cada sistema deve apresentar receita suficiente para sua própria operação. Essa configuração sugere que os recursos estejam de forma mais clara, transparente e objetiva alocados, podendo ser mais apropriada a países desenvolvidos e que já apresentam índices de atendimento mais próximos à universalização. Normalmente, o valor da tarifa de esgoto é superior e independente da tarifa de água e não existe tarifa diferenciada para população de menor renda, como existe no Brasil.

A diferença de valores cobrados entre um e outro município na Alemanha, resultado dos sistemas descentralizados e independentes, tem gerado, por outro lado, desconforto e protestos da população, repercutidos na mídia local. Uma matéria publicada no jornal digital de *Stuttgart*, apresentada na Figura 89, critica a extrema diferença de preços entre os municípios e a falta de transparência nas contas das empresas, apontando diferenças de valores em um gráfico de barras e comparando os valores que uma família padrão gasta por ano com água em diferentes municípios de uma mesma região. A diferença entre o município com a menor e a maior tarifa é de 3,5 vezes, de 262 a 911 euros em *Ludwigsburg* e *Potsdam*, respectivamente.

Figura 89 – Matéria do Jornal digital de *Stuttgart* tem como título “Diferença extrema de preços entre municípios”, ilustrando diferença de tarifa de água entre municípios da mesma região



FONTE: Adaptado de *Stuttgarter Nachrichten* (Notícias do cidadão de *Stuttgart*) (2017).

Outro aspecto relevante identificado na Alemanha está relacionado ao planejamento de investimentos. A vida útil das estruturas e dos equipamentos, incluindo previsão de equipamentos reserva e substituição de peças e equipamentos é verificada visando provisionar recursos ainda na fase de projeto. Dessa forma, é possível definir *Capex* e *Opex* de forma precisa, incluindo, além da estimativa de obra, dos custos com energia, insumos e produtos, os custos de manutenção preventiva e de troca de equipamentos, permitindo que tais valores façam parte da composição da tarifa cobrada da população, diluindo na composição da tarifa o montante necessário para investimentos previstos ao longo dos anos. Cabe ressaltar que a previsão de manutenções preventivas e de substituição de peças e equipamentos conforme a vida útil evita ações emergenciais ocasionadas por necessidade de manutenções corretivas, ou seja, trabalha-se com manutenções programadas, evitando situações emergenciais ou inesperadas.

#### 4.7 ANÁLISE SWOT E INDICAÇÃO DE AÇÕES PARA MELHORIAS

A análise *SWOT* foi realizada para as etapas de “projeto”, “implantação” e “operação”, incluindo, assim, detalhes de concepção, dimensionamento, projeto, obra, aquisição de equipamentos, operação e manutenção. Para cada uma destas etapas e para cada aspecto estudado, foram apontados pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças. A Matriz *SWOT* foi alimentada com as informações obtidas a partir da revisão de literatura e a partir dos resultados e discussões realizadas ao longo do presente estudo, considerando o que foi verificado durante as pesquisas teóricas, as visitas técnicas e as análises dos dados das ETEs em escala operacional.

Os aspectos diretamente relacionados aos filtros percoladores incluíram desde a escolha do filtro percolador como processo unitário aeróbio a compor o fluxograma de uma ETE, passando por aspectos de retenção de sólidos grosseiros, retenção de areia e gorduras, métodos de dimensionamento, meio suporte, sistema de distribuição de vazão, lavagem do meio suporte, colmatção, aeração natural, recirculação, nitrificação e desnitrificação, sistema de extravasamento da vazão afluente do filtro, odores e corrosão.

O quadro resumo com todas as informações para cada etapa e cada aspecto analisado, compondo a Matriz *SWOT* desenvolvida, pode ser visualizado no Apêndice C.

Os pontos fortes, pontos fracos, as oportunidades e as ameaças para cada etapa e cada aspecto abordado no estudo, bem como a discussão da análise cruzada realizada a partir da Matriz *SWOT*, estão apresentados nos subitens a seguir.

As discussões que subsidiam ações para melhorias foram elaboradas a partir do que foi verificado na revisão de literatura, dos estudos de dimensionamento realizados nesse trabalho, das experiências verificadas no Paraná e no Sul da Alemanha e do cruzamento de informações que compõem a Matriz *SWOT*.

Cada subitem apresentado a seguir descreve, portanto, a análise cruzada das informações, subsidiando ações a serem adotadas ou implantadas para todos os aspectos que influenciam o bom funcionamento de um filtro percolador.

Para todas as ações, recomenda-se realizar ciclos de avaliação *PDCA – Plan, Do, Check, Act – or ajust* (planeje, faça, confira, atue – ou ajuste) visando melhoria contínua dos processos.

#### 4.7.1 Quanto à escolha de filtros percoladores para compor os processos de uma estação de tratamento de esgoto

A primeira ponderação é que cada solução deve ser estudada e avaliada individualmente, pois as variáveis locais, do porte da ETE e dos recursos disponíveis para investimento, implantação, operação e manutenção, bem como as características do esgoto afluente, os demais componentes e processos unitários propostos ou em operação, e as características do corpo receptor podem influenciar os resultados do estudo de viabilidade técnica e econômica.

Tanto a literatura quanto outros estudos realizados sugerem que para atingir o mesmo objetivo quanto à remoção de carbono e quanto à nitrificação, normalmente o custo de implantação dos filtros percoladores é superior ao de sistemas de lodos ativados, enquanto os custos de operação e manutenção dos sistemas de lodos ativados são superiores aos verificados para os filtros percoladores. Isso ocorre porque na implantação dos filtros percoladores há um custo elevado referente ao meio suporte, enquanto na operação e manutenção dos lodos ativados são verificados custos elevados relacionados ao consumo de energia para aeração do sistema e à necessidade de mão de obra especializada operando em tempo integral.



Para definir a melhor configuração e os melhores processos a serem implantados em uma ETE, é fundamental elaborar uma análise *Capex* e *Opex* considerando custos diretos e indiretos relacionados a cada situação.

Dependendo da qualidade do efluente final exigida e dos demais fatores a serem analisados em um estudo de viabilidade, há expectativa de que a relação *Capex* e *Opex* para filtros percoladores seja mais vantajosa se comparada à relação obtida para lodos ativados, sendo os principais fatores o consumo de energia e o custo de mão de obra especializada 24 h verificados para os sistemas com lodos ativados.

Os filtros percoladores e os sistemas de lodos ativados possuem princípios semelhantes de funcionamento biológico, sendo um com biomassa fixa aderida e outro com biomassa livre em suspensão, objetivando os mesmos resultados. Os dois processos não necessariamente são apenas concorrentes, mas também podem ser complementares dentro de um fluxograma de uma estação de tratamento de esgoto, podendo ser viável o estudo e o emprego dos dois processos unitários de forma combinada.

Frente às considerações iniciais quanto à escolha de filtros percoladores, nos subitens a seguir estão apresentados os pontos fortes e os pontos fracos, bem como as oportunidades e ameaças, relacionados posteriormente na análise cruzada da Matriz *SWOT*.

#### 4.7.1.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Processo unitário biológico aeróbio que oferece eficiência elevada para remoção de matéria orgânica e possibilidade de nitrificação;
- Dimensionamento permite flexibilidade para atingir eficiências maiores em etapa futura, implantando módulos adicionais para reduzir a taxa de aplicação hidráulica e transformando os filtros de alta taxa para baixa taxa;
- Dimensionamento permite flexibilidade para atingir eficiências maiores em etapa futura, aumentando a altura útil dos filtros, aumentando o tempo de contato entre o efluente e o meio suporte;
- Dimensionamento permite flexibilidade para atingir eficiências maiores em etapa futura, substituindo o meio suporte por material com maior área superficial

específica e maior capacidade de empilhamento, aumentando adequadamente a taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica, conforme a capacidade do meio suporte;

- Processo biológico de aeração natural e que não depende de equipamentos eletromecânicos para promover aeração forçada, sendo um fator relevante quanto ao consumo energético e à sustentabilidade do processo;
- Processo biológico que não demanda a adição de produtos químicos, sendo um fator relevante quanto aos custos de operação, à geração de lodo e à sustentabilidade do processo;
- Processo unitário com a relação *Capex* e *Opex* comumente vantajosa se comparado a outros processos de aeração forçada que oferecem a mesma eficiência para remoção de matéria orgânica e para nitrificação.

#### Para a etapa de implantação:

- Métodos construtivos simplificados;
- Possibilidade de utilizar materiais alternativos para o meio suporte, como o plástico estruturado, que permite o emprego de soluções de construção alternativas e a utilização de materiais de construção alternativos, podendo representar um conjunto de soluções viável financeiramente para a obra e que oferece vantagens operacionais e de manutenção.

#### Para a etapa de operação e manutenção:

- Princípios e conceitos simplificados para promover o bom funcionamento do processo unitário, para garantir o controle da operação e para realizar as atividades de manutenção;
- Custos de operação e manutenção (*Opex*) reduzidos se comparados aos sistemas de lodos ativados, principalmente em função do baixo consumo de energia e da mão de obra especializada 24 h necessária para sistemas de lodos ativados;
- Possibilidade de automatização para controle da vazão afluente ao filtro, variando a vazão a ser recirculada conforme a vazão afluente à ETE, visando à alimentação constante do filtro e à alimentação constante do meio suporte;

- Possibilidade de implantação de soluções técnicas simples e viáveis para os problemas mais recorrentes verificados nas ETEs em operação, com base no que foi visto durante as visitas técnicas, confirmando o que apresenta a literatura específica e outros estudos.

#### 4.7.1.2 W (pontos fracos)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- A definição de parâmetros de projeto e parâmetros operacionais como taxa de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica, área superficial específica do meio suporte, altura útil do meio suporte, taxa de recirculação, entre outras variáveis fundamentais para o dimensionamento e para o funcionamento adequado, devem estar contempladas desde a etapa de concepção do projeto;
- A utilização de parâmetros internacionais definidos experimentalmente em locais de clima temperado predomina nas referências de literatura e precisa ser adequada à realidade tropical e subtropical (há literatura nacional e internacional, a citar Von Sperling e Chernicharo (2005) e DWA (2016), que estabelecem faixas de valores para caracterização do afluente e para parâmetros de projeto e de operação mais adequados à realidade nacional).

##### Para a etapa de implantação:

- Custo de implantação (*Capex*) elevado se comparado a sistemas de lodos ativados, principalmente em função do volume de meio suporte a ser adquirido (porém o *Opex* normalmente é reduzido e compensa o alto *Capex*);
- Dificuldades quanto à disponibilidade de fornecedores e de materiais a serem utilizados como meio suporte com qualidade que atenda à especificação de projeto, seja pedra brita, plástico ou outros.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- Problemas isolados ou combinados relacionados à colmatção do meio suporte, resultantes de falhas de projeto, implantação ou operação e manutenção;

- Problemas relacionados aos gases corrosivos e aos odores provenientes do tratamento anaeróbio a montante, resultantes de materiais não resistentes à corrosão e da não implantação de soluções adequadas para captação e tratamento dos gases corrosivos a montante do filtro.

#### 4.7.1.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Processo unitário que agrega características sustentáveis a uma ETE por ser um processo biológico com aeração natural, por apresentar baixo consumo energético e por não demandar adição de produtos químicos;
- Processo unitário interessante tanto para implantação de novas ETEs quanto para melhoria e ampliação de ETEs existentes, principalmente em países em desenvolvimento em que se objetiva à universalização do saneamento;
- Processo unitário que pode contribuir para o desenvolvimento quando se trata de implantação de políticas e programas para redução do déficit de tratamento de esgoto e para suprir as demandas de implantação de novas ETEs, visando à universalização do saneamento;
- Processo unitário interessante para suprir a demanda de implantação de pós tratamento e de ampliação e melhorias em ETEs existentes;
- Possibilidade de atualização, modernização e revisão de aspectos construtivos, dos materiais e das soluções empregadas em novas ETEs e em ETEs em operação a partir da aplicação de conceitos, materiais, soluções e métodos de dimensionamento mais recentes apresentados;
- Possibilidade de desenvolver pesquisas acadêmicas e profissionais e aplicações em escala reduzida ou operacional a partir de parcerias entre universidades, companhias de saneamento, empresas prestadoras de serviço ou fornecedoras de equipamentos e grupos científicos como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “INCT ETEs Sustentáveis”.

Para a etapa de implantação:

- Implantação de filtros percoladores a partir de conceitos reformulados, utilizando novos materiais de construção e novas soluções de obra.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Aplicação e implantação de soluções simples para suprir e resolver dificuldades e problemas relatados em experiências anteriores.

4.7.1.4 T (ameaças)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Resistências conceituais entre técnicos e tomadores de decisões, formadas a partir de experiências malsucedidas, que ocorreram por motivos ou problemas de projeto, implantação ou operação, que já foram sanados e para os quais há solução, sendo possível implementar a solução antecipadamente e em caráter preventivo, eliminando a possibilidade de recorrência da dificuldade ou problema;
- Para casos em que a elaboração do projeto e das especificações básicas é contratado e terceirizado, a conferência dos produtos desenvolvidos deve ser realizada por especialistas, levando em consideração todos os aspectos discutidos, visando eliminar possíveis ameaças à qualidade dos projetos e, conseqüentemente, prezando pela qualidade e pelo sucesso das etapas de implantação, operação e manutenção.

Para a etapa de implantação:

- Mesmo com a atuação correta por parte da fiscalização da obra, pode haver ameaças quanto à qualidade dos materiais empregados e da execução da obra, podendo comprometer aspectos fundamentais para garantir o bom funcionamento de um filtro percolador.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Experiências operacionais negativas anteriores podem influenciar decisões negativas quanto à operação e à manutenção de filtros percoladores, mesmo sendo um processo unitário tradicional e conhecido que apresenta características simplificadas e vasta experiência acadêmica e prática.

#### 4.7.1.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

A análise preliminar realizada para este item já indicou que apesar de o custo de implantação ser elevado se comparado ao de sistemas de lodos ativados, a relação *Capex* e *Opex* indica menores custos totais para sistemas com filtros percoladores, se comparados aos custos de operação dos lodos ativados, principalmente em função do consumo energético e da necessidade de mão de obra especializada 24 h.

A análise cruzada da Matriz *SWOT* indicou que os pontos fortes relacionados podem minimizar ou suprimir os pontos fracos percebidos, bem como podem garantir uma oportunidade e prevenir ameaças. Os pontos fracos e as ameaças podem ser prevenidos, minimizados ou contornados com conceitos, práticas e ações de projeto, implantação e operação. Ao longo do estudo, várias soluções já em uso e que podem ser implantadas nas ETEs no Paraná foram observadas, relatadas e discutidas.

O Quadro 15 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à escolha de filtros percoladores como um dos processos unitários para implantação de uma nova ETE ou para melhorias e ampliações de uma ETE existente.

Quadro 15 – Ações e desdobramentos relacionados à escolha de filtros percoladores

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Definir parâmetros de projeto e taxas de operação na etapa de concepção e dimensionamento do projeto	Definir na etapa de concepção e realizar cálculos iterativos na etapa de dimensionamento para verificação das variáveis adotadas, incluindo taxa de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica, área superficial específica do meio suporte, altura útil do meio suporte, taxa de recirculação, entre outras
Prever possibilidade de ampliação da capacidade hidráulica e possibilidade de melhoria da eficiência do tratamento e realização de nitrificação considerando aumento da população ou estabelecimento de legislações mais restritivas ou metas progressivas	Dimensionar os filtros de tal forma que seja possível absorver cargas hidráulicas ou orgânicas maiores ou atingir eficiências maiores em etapa futura, prevendo a implantação de mais módulos para reduzir a taxa de aplicação hidráulica, transformando os filtros de alta para baixa taxa, bem como trocando o meio suporte, aumentando a altura útil dos filtros, ou outras soluções



Quadro 15 – Ações e desdobramentos relacionados à escolha de filtros percoladores (continuação)

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Utilizar variáveis, equações e métodos de dimensionamento adaptados e adequados à realidade local	Dimensionar os filtros a partir de equações que possuam mais variáveis, tais que considerem aspectos locais como temperatura
Considerar utilização de materiais e soluções construtivas modernas e alternativas	Utilizar materiais e soluções que ofereçam vantagens de implantação, operação e manutenção e considerar que ao optar por um material específico a ser utilizado como meio suporte, por exemplo, novas oportunidades de adotar soluções construtivas vantajosas quanto à implantação, operação e manutenção são possíveis
Analisar alternativas de processos unitários aeróbios para pós tratamento de reatores anaeróbios	Considerar todos os aspectos discutidos nesse estudo para compor uma análise de <i>Capex</i> e <i>Opex</i> que represente a realidade de implantação e de operação
Prever sistema preliminar eficiente para evitar a colmatação do meio suporte	Utilizar conceitos e soluções técnicas simplificadas para especificar equipamentos eficientes para evitar a presença de sólidos orgânicos e inertes e de gorduras no afluente ao filtro percolador
Prever sistema de coleta, captação e tratamento de gases odoríferos e corrosivos a montante do filtro percolador	Utilizar conceitos e soluções técnicas simplificadas para implantar sistema de desprendimento, captação e tratamento de H <sub>2</sub> S para evitar odor e corrosão ocasionada pelo desprendimento desse gás agressivo presente no afluente ao filtro percolador em função da atividade anaeróbia realizada a montante do filtro
Prever sistema de recirculação do efluente do filtro percolador ou do decantador secundário no próprio filtro para manter a vazão afluente ao filtro constante e para melhorar a qualidade do efluente final	Projetar uma unidade de recalque a jusante do filtro percolador com sistema que ajuste a vazão a ser recirculada em função da vazão afluente à ETE de forma que a vazão afluente ao filtro seja sempre constante
Atuar de forma técnica e rígida na fiscalização de projetos e obras e na aprovação de materiais e equipamentos	Considerar o conhecimento total do técnico fiscal de projeto e de obra quanto aos detalhes fundamentais para o bom funcionamento do filtro percolador, bem como envolver o responsável técnico do projeto para acompanhamento periódico ou eventual da execução da obra
Desenvolver pesquisas acadêmicas e profissionais em escala reduzida e operacional a partir de parcerias entre instituições	Buscar parcerias entre universidades, companhias de saneamento, empresas prestadoras de serviço ou fornecedoras de equipamentos e grupos científicos como o INCT ETEs Sustentáveis para aprimorar conceitos e práticas visando à implantação de filtros percoladores com embasamento teórico e prático

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.2 Quanto à retenção de sólidos grosseiros

##### 4.7.2.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- A utilização de gradeamento médio de 20 mm seguido de gradeamento ou peneiramento fino de 10, 6 ou 3 mm), deve ser prevista em fase de projeto, bem como a execução de canal paralelo e equipamento reserva, conforme o porte da

ETE (preferencialmente gradeamento de 3 mm ou peneiramento de 6 mm, sendo apontados como equivalentes por fornecedores);

- A especificação básica dos equipamentos deve ser elaborada em fase de projeto e é fundamental para que um equipamento adequado, eficiente e de qualidade seja adquirido quando em fase de implantação;
- Os materiais e as peças componentes dos equipamentos devem apresentar características de resistência à corrosão;
- A especificação do equipamento e das peças componentes deve indicar possíveis restrições relacionadas ao uso de soldas ou outros processos que possam prejudicar a proteção à corrosão dos materiais;
- A operação dos equipamentos pode ser manual ou mecanizada, de acordo com o porte da ETE e conforme a quantidade de operadores prevista para a ETE.

Para a etapa de implantação:

- A aquisição de um equipamento eficiente e de qualidade depende das exigências apresentadas na especificação básica;
- O rigor e a assertividade da atuação da fiscalização da obra quanto à aprovação de equipamentos adquiridos a serem instalados pelo empreiteiro reflete no sucesso da obra e da operação da ETE;
- A fiscalização da obra deve incluir o acompanhamento da realização de testes e o acompanhamento do período de pré-operação assistida, previamente estabelecido nas exigências de projeto, das especificações básicas e do contrato da obra.

Para a etapa de operação e manutenção:

- A retirada de sólidos grosseiros reflete em melhorias de todos os processos a jusante, aumentando a eficiência da ETE e reduzindo a manutenção necessária nos demais processos unitários;
- A implantação de gradeamento ou peneiramento fino resultam em menor geração de resíduos sólidos nas etapas de tratamento a jusante;

- A implantação de equipamentos de operação mecanizada elimina serviço manual e reduz custos e riscos biológicos para os operadores.

#### 4.7.2.2 W (pontos fracos)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- A elaboração da especificação básica é fundamental para a aquisição e para o funcionamento adequado (se mal elaborada, reflete negativamente nas etapas de aquisição, implantação, operação e manutenção);
- A implantação de gradeamento ou peneiramento fino mecanizado exige equipamento reserva ou canal com gradeamento reserva, podendo ser de operação manual, dependendo do porte da ETE e da disponibilidade de operadores;
- A implantação de gradeamento fino em ETEs existentes e em operação demanda projeto para reforma e adaptações no sistema existente para receber novos equipamentos, incluindo solução de desvio da vazão durante a obra ou de construção de novo canal com os novos equipamentos de gradeamento e posterior desativação do canal existente.

##### Para a etapa de implantação:

- A implantação de gradeamento ou peneiramento fino mecanizado exige aquisição de equipamento reserva ou construção de canal com gradeamento reserva;
- A implantação de gradeamento fino em ETEs existentes e em operação demanda obra de reforma e adaptações no sistema existente para a instalação dos novos equipamentos.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- A operação de gradeamento ou peneiramento fino mecanizado exige vistoria eletromecânica periódica e manutenção preventiva;
- A operação de gradeamento ou peneiramento fino mecanizado exige plano eficiente para situações de parada não programada, incluindo equipamento

reserva e operação emergencial para que a retenção de sólidos continue em operação, visando não prejudicar os processos a jusante;

- A operação de gradeamento ou peneiramento fino tem como consequência a maior retenção de sólidos e, portanto, o aumento da geração de resíduos na etapa de tratamento preliminar (refletindo em benefícios nos demais processos a jusante).

#### 4.7.2.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Para os novos projetos e para os projetos de melhoria e ampliação de ETEs existentes, pode-se estudar a possibilidade de incluir a utilização de peneiras estáticas a montante do filtro percolador para reter sólidos e gorduras aglutinados durante o tempo de detenção nos reatores anaeróbios ou decantadores primários.

Para a etapa de implantação:

- A quantidade de fornecedores disponíveis no mercado favorece a livre concorrência, pode promover maior competitividade e a consequente redução de custos de aquisição, e possibilita a aquisição de bons equipamentos.

#### 4.7.2.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Equipamentos não homologados ou de baixa qualidade podem comprometer o funcionamento da ETE;
- Equipamentos que não atendem às especificações básicas podem causar problemas à operação e à manutenção da ETE;
- A disponibilidade do fornecedor em atendimento pós-venda e em solucionar problemas ou falhas nos equipamentos reflete na operação da ETE.

#### 4.7.2.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Os pontos fracos elencados estão relacionados à necessidade de prever equipamentos de retenção de sólidos de 20 a 3 mm no sistema preliminar e à melhoria dos equipamentos e das práticas de operação e manutenção, e podem ser solucionados a partir dos pontos fortes apontados, com a elaboração de especificações básicas que contemplem todos os detalhes necessários para que as etapas de aquisição e implantação sejam bem-sucedidas e para que a operação realize práticas adequadas. Os pontos fortes ressaltam a importância da definição de rotinas de operação e manutenção preventiva dos equipamentos, prezando pelo bom funcionamento, pela preservação da vida útil e pelo cumprimento do objetivo de retenção de sólidos na etapa preliminar de tratamento.

A quantidade de fornecedores disponíveis no mercado, com equipamentos prontos ou fabricados conforme a especificação, motiva a elaboração da especificação composta por detalhes técnicos suficientes para garantir qualidade e bom funcionamento sem comprometer a livre concorrência, sendo este fato colocado como uma oportunidade aliada a um ponto forte nas etapas de projeto e implantação.

As oportunidades verificadas são potencializadas com os pontos fortes listados, bem como as ameaças verificadas são minimizadas ou eliminadas com a prevenção contra equipamentos de baixa qualidade ou que não atendam às especificações. Ressalta-se a possibilidade de verificar em etapa de aquisição ou mesmo especificar em projeto condicionantes relacionadas à disponibilidade do fornecedor para atendimento pós-venda, fornecimento de peças ou realização de manutenção emergencial, reduzindo uma ameaça apontada para as etapas de operação e manutenção.

A necessidade de melhoria do processo de tratamento preliminar com equipamentos que demandam operação e manutenção preventiva, bem como a maior produção de resíduos sólidos na fase preliminar de tratamento são consequência de uma melhoria significativa para todos os demais processos unitários que compõem a ETE. Os benefícios são maiores e refletem na eficiência global da estação de tratamento de esgoto, viabilizando o investimento de implantação e operação nessa etapa de tratamento preliminar.

O Quadro 16 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à retenção de sólidos grosseiros nas ETEs com filtros percoladores.

Quadro 16 – Ações e desdobramentos relacionados à retenção de sólidos grosseiros

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Projetar sistemas preliminares adequados	Prever sistemas eficientes para remoção de sólidos, areia e gorduras desde a fase de concepção de projeto, utilizar gradeamento médio e fino de forma combinada, prever operação manual ou mecanizada conforme o porte da ETE e a disponibilidade de operadores
Especificar de forma detalhada os equipamentos e os procedimentos para instalação, operação e manutenção	Especificar os equipamentos e os procedimentos para operação e manutenção preventiva de forma detalhada visando o bom funcionamento dos equipamentos, a prevenção contra a corrosão e a preservação da vida útil dos equipamentos, incluindo instruções referentes à realização de soldas, manutenções e limpezas (a quantidade de fornecedores disponíveis permite o detalhamento sem comprometer a livre concorrência)
Prever equipamento reserva ou solução alternativa para realização de paradas programadas	Incluir aquisição de equipamento reserva ou elaborar solução de projeto que permita realizar paradas programadas ou emergenciais sem prejudicar a eficiência do sistema preliminar e da remoção de sólidos
Prever soluções de obra e alterações de rotina de operação e manutenção quando se objetiva a inclusão de gradeamento ou peneiramento fino em ETE em operação	Considerar a necessidade de realizar obra para desvio da vazão ou de um novo canal de gradeamento e considerar que o gradeamento fino retém mais resíduos, necessitando maior frequência de limpeza em função do maior volume a ser retirado e revisão de contratos de caçamba e de destinação final dos resíduos
Estudar a possibilidade de utilizar peneira estática a montante do filtro percolador	Para novos projetos e para ampliações e melhorias de ETEs em operação, pode-se verificar a possibilidade de utilizar peneiras estáticas para retenção de sólidos e gorduras aglutinados durante o tempo de detenção nos reatores anaeróbios, presentes no afluente aos filtros

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.3 Quanto à retenção de areia e gordura

##### 4.7.3.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- A concepção, o dimensionamento e o detalhamento do projeto do processo unitário para retenção de areia são de conceitos e funcionamento simples;
- A retenção de areia e gordura deve fazer parte do fluxograma de processos de toda e qualquer estação de tratamento de esgoto, sendo projetadas diferentes configurações de desarenador e tendo diferentes soluções para retenção de gordura, conforme o porte da ETE;
- A concepção, o dimensionamento e o projeto da unidade de retenção de areia podem integrar na mesma unidade o processo de retenção de gordura, com aeração na caixa de areia.



Para a etapa de implantação:

- A implantação adequada do processo unitário e a aquisição de equipamentos eficientes e de qualidade dependem das exigências apresentadas no projeto e na especificação básica;
- A fiscalização da obra deve ser rigorosa quanto à aprovação dos equipamentos adquiridos a serem instalados pelo empreiteiro.

Para a etapa de operação:

- A etapa para retenção de areia é de simples operação e reflete em benefícios diretos e indiretos para a operação, manutenção e eficiência dos processos a jusante, reduzindo ou eliminando o acúmulo desse material que pode prejudicar equipamentos ou processos unitários de tratamento a jusante, inclusive os filtros percoladores;
- A realização da retenção de gordura combinada ao desarenador por meio de um sistema de aeração na caixa de areia aproveita a estrutura de um processo existente e melhora a operação e a eficiência de todos os processos a jusante, sendo que para os reatores anaeróbios, o efeito é a redução significativa de formação de espuma, enquanto para os filtros percoladores, o efeito é a diminuição da probabilidade de obstrução do sistema de distribuição do afluente e de colmatção do meio suporte.

#### 4.7.3.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Para realizar retenção de gordura na caixa de areia aerada, é necessário adaptar a estrutura da caixa de areia e instalar um sistema de aeração, representando aumento do consumo de energia na ETE (os benefícios operacionais, de manutenção e de eficiência a partir da retenção de gordura podem ser mais significativos se comparados ao consumo energético, viabilizando a adequação);

- A retirada da gordura flotada na caixa de areia exige a elaboração de projeto eletromecânico e de automação, bem como de especificações básicas e manual de operação;
- Experiências internacionais bem-sucedidas com o emprego de caixa de areia aerada não garantem o bom funcionamento e a retenção de gorduras em caixas de areia aeradas implantadas no Brasil e não podem ser aplicadas sem a realização de testes e experimentos que validem e comprovem o funcionamento adequado em condições nacionais ou tropicais;
- A retirada da gordura flotada em reatores anaeróbios exige sistema de retirada automatizado ou retirada manual periódica (diferentes configurações de sistemas e diferentes procedimentos para retirada de espuma já foram idealizados e implantados, mas dependendo da configuração do reator anaeróbio, ainda são verificadas dificuldades);
- A retirada de areia e gorduras implica no aumento do volume de resíduos gerados, que deve ser corretamente processado e destinado.

Para a etapa de implantação:

- A implantação de caixa de areia aerada implica na aquisição de equipamentos para operação e equipamentos e peças reserva para substituições programadas ou emergenciais;
- Para ETEs em operação, a implantação de caixa de areia aerada demanda obra de reforma e adaptações no sistema existente para adequação das estruturas existentes e instalação dos equipamentos, observando o fato de que a operação da etapa preliminar de tratamento deve ser mantida em operação.

Para a etapa de operação e manutenção, temos:

- A retirada da gordura flotada na caixa de areia exige equipamento eletromecânico com operação automatizada ou operação manual periódica programada, manutenção preventiva e peças de reserva para manutenções emergenciais;
- Necessidade de planejamento e definição de rotina de operação e de manutenção preventiva, independente do sistema empregado;

- Aumento do consumo de energia com retenção de gorduras na caixa de areia aerada, em função do sistema de aeração e do funcionamento automatizado dos equipamentos eletromecânicos.

#### 4.7.3.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto, temos:

- Estudar o funcionamento e a operação de caixa de areia aerada, realizando testes e definindo parâmetros nacionais para dimensionamento, operação e manutenção desse sistema;
- Estudar a implantação de processos complementares para viabilizar a recuperação da areia para reutilização do material lavado para diferentes aplicações na construção civil ou mesmo na própria ETE;
- Estudar o processo de digestão da gordura como uma fonte para geração de energia, aumentando as características sustentáveis da ETE;
- Estudar a possibilidade de utilizar os gases capturados e tratados no filtro biológico, na etapa de aeração do afluente ao filtro percolador, para realizar a aeração da caixa de areia, atentando para a resistência à corrosão dos materiais empregados.

#### 4.7.3.4 T (ameaças)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Consultoria internacional não deve impor padrão de projeto de caixa de areia aerada sem antes confirmar através de pesquisas e experimentos a viabilidade e o funcionamento desse processo unitário nas condições nacionais (clima, característica do afluente, entre outros).

Para a etapa de operação e manutenção:

- Problemas eletromecânicos que demandam atendimento do fornecedor e prazos prolongados para reparo ou substituição dos equipamentos, ameaçando a

operação adequada da ETE caso não existam planos de contingência ou peças e equipamentos para substituição.

#### 4.7.3.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

A análise realizada para a retirada de areia e gordura é semelhante à apresentada para o item anterior referente a gradeamento e peneiramento fino.

Há uma oportunidade de incrementar a unidade de retirada de areia visando a remoção de mais um componente do afluente, a gordura. Essa oportunidade deve ser estudada e validada e, se viável, somada aos pontos fortes apontados visando à melhoria do funcionamento e da operação de todos os processos unitários a jusante.

A necessidade de projeto e obra eletromecânicos e melhoria do processo com equipamentos que demandam operação e manutenção preventiva para a implantação de uma caixa de areia aerada, bem como a maior produção de resíduos sólidos na fase preliminar de tratamento, são consequências para se obter uma melhoria significativa para toda a ETE. Os benefícios da retirada de gordura são significativos e refletem na eficiência global da estação de tratamento de esgoto, viabilizando o investimento nessa etapa de tratamento preliminar.

Outra oportunidade interessante e de simples solução apontada é a implantação de sistemas de lavagem de areia para reutilização da areia para fins diversos, principalmente na construção civil. Essa prática agrega sustentabilidade ao processo, atribuindo reutilização de volumes que seriam destinados a aterro sanitário, podendo representar viabilidade econômica, a ser avaliada caso a caso.

O Quadro 17 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à retenção de areia e gorduras nas ETEs com filtros percoladores.

Quadro 17 – Ações e desdobramentos relacionados à retenção de areia e gordura

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Projetar, implantar e operar adequadamente o processo de retenção de areia	Promover benefícios diretos e indiretos para a operação, manutenção e eficiência de todos os processos e equipamentos a jusante
Prever a lavagem da areia para reutilização para fins diversos	Estudar e projetar sistemas de lavagem de areia que possam ser implantados tanto em novas ETEs quanto em ETEs existentes visando o reaproveitamento da areia
Estudar a possibilidade de utilização de caixa de areia aerada	Estudar o funcionamento da caixa de areia aerada em condições nacionais e validar os parâmetros de funcionamento e as especificações dos equipamentos de aeração e de raspagem de gordura e de areia verificados em experiências internacionais

Quadro 17 – Ações e desdobramentos relacionados à retenção de areia e gordura (continuação)

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Estudar as adaptações necessárias para transformar uma caixa de areia em uma caixa de areia aerada	Adaptar a estrutura da caixa de areia e instalar um sistema de aeração (os benefícios operacionais, de manutenção e de eficiência a partir da retenção de gordura podem ser mais significativos se comparados ao consumo energético adicional);
Adotar caixa de areia aerada para retenção simultânea de areia e gordura	Aproveitar a estrutura de um processo existente de retenção de areia para incluir um processo de retenção de gordura, melhorando a operação e a eficiência de todos os processos unitários a jusante, sendo que para os reatores anaeróbios, o efeito é a redução significativa de formação de espuma, enquanto para os filtros percoladores, o efeito é a diminuição da probabilidade de obstrução do sistema de distribuição do afluente e de colmatagem do meio suporte
Projetar sistemas eficientes para remoção da espuma flotada nos reatores anaeróbios	A retirada da gordura flotada em reatores anaeróbios reflete na melhoria das condições do afluente ao filtro percolador e exige sistema de retirada automatizado ou retirada manual periódica (diferentes configurações de sistemas e diferentes procedimentos para retirada de espuma já foram idealizados e implantados, mas dependendo da configuração do reator anaeróbio, ainda são verificadas dificuldades)
Prever soluções de obra e alterações de rotina de operação e manutenção quando se objetiva implantar soluções para melhorar a retenção de gorduras e espuma em ETE em operação	Considerar a necessidade de realizar obras civis e eletromecânicas para adaptar sistemas para retenção de gordura e espuma e considerar o aumento do volume de material retido, necessitando maior frequência de limpeza em função do maior volume a ser retirado e revisão de contratos de caçamba e de destinação final dos resíduos
Estudar a possibilidade de utilização dos gases capturados e tratados na etapa de aeração do afluente ao filtro percolador, para realizar a aeração da caixa de areia	Estudar a viabilidade de encaminhar os gases capturados e tratados na aeração realizada no afluente ao filtro percolador (para evitar corrosão e maus odores) para realizar aeração da caixa de areia aerada

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.4 Quanto aos métodos de dimensionamento de filtros percoladores

##### 4.7.4.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Os métodos de dimensionamento e as equações foram recentemente atualizadas e revisadas, objetivando à adequação para aplicação em regiões de temperaturas quentes ou frias;
- Os métodos de dimensionamento e as equações foram recentemente atualizadas e revisadas, contemplando mais variáveis de projeto e de operação, conferindo ao dimensionamento maior probabilidade de representação do funcionamento e da eficiência de um filtro percolador.

Para a etapa de operação e manutenção:

- O método de dimensionamento DWA (2016) permite verificar a eficiência do filtro percolador a cada segmento do meio suporte, sendo possível estabelecer um gráfico de redução da DQO e de conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato esperado em função da profundidade do filtro, sendo útil à operação em diferentes situações, para monitoramento e controle operacional.

4.7.4.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Métodos e equações que consideram poucas variáveis e resultam em um dimensionamento que representa melhor o funcionamento de um filtro percolador ainda são utilizados;
- Dimensionamento dos filtros percoladores com a utilização de coeficientes de tratabilidade e outras taxas e constantes não adaptadas à realidade local, podendo representar uma diferença entre a eficiência esperada e obtida, podendo comprometer o atendimento aos parâmetros de lançamento estabelecidos em outorga;
- Falhas de concepção, dimensionamento e projeto afetam a qualidade da obra, a eficiência do processo, a operação e a manutenção (os parâmetros de dimensionamento e de operação devem ser utilizados e adotados de forma cautelosa e criteriosa, sempre adequados à realidade local e às características do caso em estudo).

4.7.4.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Estudos e experimentos dedicados são necessários para amadurecer a utilização do novo método e das novas e reformuladas equações de dimensionamento apresentadas;



- Possibilidade de estabelecer parâmetros personalizados à realidade local do Paraná a partir do que foi sugerido pela DWA (2016) e de estudos e experimentos dedicados.

#### 4.7.4.4 T (ameaças)

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- Possibilidade de não obter sucesso da aplicação do novo método e das novas e reformuladas equações quando do monitoramento da unidade em operação;
- Possibilidade de avaliar ajustes necessários ao método de dimensionamento DWA (2016) à realidade nacional ou local quando da aplicação do dimensionamento e do monitoramento da unidade em operação (para estes casos, deve-se verificar se todas as premissas e condicionantes estabelecidas quanto ao funcionamento, à operação e à manutenção de todos os processos unitários relacionadas ao bom funcionamento do filtros percolador estão sendo atendidas para, então julgar a necessidade de ajustes do método de dimensionamento caso os resultados obtidos não estejam de acordo com os resultados esperados).

#### 4.7.4.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Quanto aos métodos de dimensionamento e às falhas de concepção, os pontos fortes apontados podem ser utilizados para eliminar os pontos fracos, principalmente quanto à utilização de equações de dimensionamento que consideram mais variáveis que influenciam o funcionamento de um filtro percolador, abandonando, assim, equações mais antigas e que não consideravam diversas variáveis significativas. As equações de dimensionamento foram recentemente atualizadas e revisadas, oferecendo maior aproximação à realidade nas estimativas de eficiência calculadas. As falhas de concepção relacionadas ao dimensionamento serão minimizadas ou mesmo eliminadas com esta atualização, melhorando o dimensionamento e a estimativa de eficiência calculada em projeto, refletindo em melhorias para a operação e a manutenção.

Para prevenir ameaças relacionadas à utilização de um novo método de dimensionamento, estudos dedicados podem ser realizados visando à aplicação do método e monitoramento de experimentos e de unidades em escala operacional para

identificar se há necessidade de ajustes para a aplicação de coeficientes que variam de acordo com as peculiaridades locais, para, então validar o método.

O Quadro 18 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados aos métodos de dimensionamento de filtros percoladores.

Quadro 18 – Ações e desdobramentos relacionados aos métodos de dimensionamento

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Utilizar equações modernas e atualizadas para dimensionamento	Considerar a análise de equações realizada nesse estudo e utilizar as equações que melhor representem o funcionamento de um filtro percolador em escala operacional, abandonando a utilização de equações desatualizadas
Adotar os parâmetros de dimensionamento e de operação adequados às características e à realidade local	Considerar peculiaridades locais e utilizar dados de entrada como caracterização do esgoto afluente, temperatura e outros coeficientes relacionados conforme a realidade local, podendo ser estudados ajustes de coeficientes de tal forma a representar melhor o funcionamento do filtro percolador visando a elaboração de um dimensionamento mais preciso e adequado
Desenvolver estudos adicionais dedicados à validação do método DWA (2016)	Realizar simulações de dimensionamento e estimativa de eficiência em ETEs existentes para verificar ajustes necessários aos coeficientes relacionados às variáveis locais e para verificar a aproximação dos resultados à realidade em escala operacional
Verificar melhorias obtidas com a utilização de equações modernas e atualizadas para dimensionamento	Considerar a aplicação em escala reduzida e escala operacional
Utilizar o método DWA (2016) para controle operacional	Verificar a eficiência do filtro percolador em cada segmento do meio suporte, camada a camada, estabelecendo gráficos de redução da DQO e de conversão de nitrogênio amoniacal em nitrito e nitrato para controle operacional
Operar sistemas implantados e realizar PDCA	Verificar acertos e oportunidades de melhorias para novos projetos, para novas obras e para adequar as práticas recomendadas de operação e manutenção

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.5 Quanto ao meio suporte em pedra brita

##### 4.7.5.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Recomendado pela literatura o uso meio suporte em pedra brita para filtros percoladores de baixa taxa de aplicação hidráulica, não excluindo sua utilização em filtros de alta taxa, desde que sejam verificados todos os detalhes de projeto, operação e manutenção relacionados à prevenção da colmatção, bem como

desde que verificadas as taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas adequadas ao meio suporte empregado.

Para a etapa de implantação:

- Custo de aquisição da pedra brita é inferior se comparado ao do meio suporte plástico estruturado (porém algumas características podem refletir em outros custos adicionais que inibem a economia obtida inicialmente quando da aquisição da pedra brita).

Para a etapa de operação e manutenção:

- Menor possibilidade de proliferação de moscas, vetores e caramujos em função do menor índice de vazios da pedra brita;
- Rugosidade do material favorece a fixação, o crescimento e o desenvolvimento do biofilme;
- Biofilme se fixa e se desenvolve mais rapidamente se comparado ao meio suporte plástico;
- Considerando a área superficial específica inferior à do meio suporte plástico, a eficiência de molhamento, ou seja, o aproveitamento da área superficial específica, na pedra brita tende a ser superior à eficiência de molhamento no meio suporte plástico.

#### 4.7.5.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Altura útil do meio suporte é limitada a 3,0 m para filtros de alta taxa e 2,5 m para filtros de baixa taxa;
- A menor área superficial específica resulta em menor quantidade de biofilme por volume de meio suporte;
- A menor área superficial específica resulta em maior volume total necessário;

- Material com maior massa específica exige elementos estruturais maiores e mais robustos, refletindo em um projeto estrutural mais complexo e maiores custos para construção dos elementos estruturais.

Para a etapa de implantação:

- Material com menor área superficial específica resulta em filtros de maior volume, aumentando a quantidade de material a ser adquirido, aumentando o custo de implantação;
- Material com maior massa específica exige elementos estruturais maiores e mais robustos, refletindo em maiores custos para construção dos elementos estruturais;
- Dificuldade para conseguir fornecedor que entregue a pedra brita com a qualidade necessária quanto ao tipo de rocha e quanto à granulometria e à ausência de pó de pedra;
- Necessidade de vistoria e fiscalização rigorosa quanto à qualidade da pedra brita;
- Pode demandar mão de obra adicional para separação e lavagem manual do material, visando garantir granulometria adequada e uniforme (ainda assim, por ser trabalho manual, não garante homogeneidade);
- Custo real pode ser da ordem de até 4 vezes superior ao custo orçado, dependendo da qualidade do material e da necessidade de separação e lavagem do material após o fornecimento.

Para a etapa de operação e manutenção:

- O menor índice de vazios implica em maior possibilidade de colmatção, formação de caminhos preferenciais e zonas mortas, diminuindo a qualidade do efluente final.

#### 4.7.5.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Desenvolver método para selecionar fornecedores adequados, considerando o tipo da jazida e a origem do material, a distância média de transporte (DMT) da

jazida à obra, a qualidade do material e os equipamentos utilizados para selecionar a granulometria desejada;

- Testar outros materiais semelhantes à pedra brita, tais como pedra lava e escória de alto forno.

Para a etapa de implantação:

- Apresentar demanda aos fornecedores de tal forma que estes se adequem às exigências de qualidade do material (aquisição de peneiras granulométricas e realização de lavagem da pedra);
- Desenvolver método e equipamento de obra para selecionar o material de acordo com a granulometria adequada.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Definir rotina de lavagem ou *flushing* com a desaceleração da rotação do sistema de distribuição do afluente ao filtro visando atender recomendações teóricas que previnem ou desaceleram processos de colmatção, considerando a disponibilidade operacional e principalmente as características do biofilme em cada caso analisado e ponderando que a lavagem deve ser realizada para tirar camadas excedentes da biomassa para evitar a formação de zonas de atividade biológica anaeróbia ao longo do meio suporte.

#### 4.7.5.4 T (ameaças)

Para a etapa de implantação:

- Limitação de número de fornecedores que oferecem a pedra brita com a qualidade necessária;
- Distância média de transporte (DMT) entre a jazida mais adequada e o local da obra tal que aumente demasiadamente o custo da pedra brita;
- O transporte e o descarregamento da pedra brita podem fazer com que as pedras se quebrem e também pode resultar em quantidade indesejada de pó de pedra;

- Custo real pode ser até 4 vezes superior ao custo orçado, dependendo da qualidade do material e da necessidade de separação e lavagem do material após o fornecimento, bem como dependendo da distância entre a jazida e a obra.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Processo de colmatção acelerado por fatores não considerados quando das etapas de projeto e implantação;
- Descargas clandestinas com altos teores de gorduras, óleos e graxas na rede coletora de esgoto podem acelerar processos de obstrução, formação de caminhos preferenciais e colmatção do meio suporte.

#### 4.7.5.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Quanto ao custo da pedra brita ser reduzido, apresentado como um ponto forte desse material, existe o contraponto de que o custo real pode ser até 4 vezes superior ao orçado, dependendo da qualidade da pedra e também dependendo da distância entre a jazida e a obra, sendo por isso estas considerações apresentadas como pontos fracos ou ameaças. Assim, o ponto forte apontado relacionado ao custo acaba sendo minimizado pelo ponto fraco que inclui considerações sobre a qualidade da brita e o custo real final da brita.

Quanto aos pontos fracos como profundidade limitada, menor área superficial específica, baixo índice de vazios, maior massa específica, entre outros apontados, são todos inerentes ao material, não sendo possível eliminar tais aspectos. Visando à minimização dos pontos fracos inerentes à pedra brita, deve-se considerar fatores fundamentais para o adequado dimensionamento do filtro, para a correta aplicação de taxa hidráulica e carga orgânica volumétrica e para a adequada retenção de sólidos, areia e gorduras a montante dos filtros.

A maior possibilidade de colmatção devido à dificuldade de garantir uniformidade no material, apontada como um ponto fraco, está relacionada e potencializada a uma das ameaças apontadas quanto à limitação de fornecedores de pedra brita que atendam a qualidade exigida, enfatizando que este é um aspecto que requer maior atenção quando da concepção e detalhamento de um projeto, sendo a elaboração de um procedimento para escolha do fornecedor e análise da qualidade



do material ainda durante a concepção do projeto uma prática que exige mais planejamento, mas que se apresenta como uma saída simplificada e fundamental para que tal dificuldade seja amenizada.

A distância da jazida ao local da obra é apontada como ameaça uma vez que, em etapa de projeto, pode ser orçada uma jazida mais próxima e que, apenas durante a etapa de implantação seja verificado que esta não atende a qualidade exigida, fazendo com que, já em etapa de obra, seja realizada nova busca de fornecedor, este, por sua vez, mais distante, encarecendo o custo e elevando o orçamento da obra em relação ao orçamento previsto em etapa de projeto. Esta ameaça pode ser facilmente contornada se a busca minuciosa de jazidas com condições de fornecer um material de qualidade for realizada ainda em etapa de projeto.

As ações apontadas como oportunidades podem ser realizadas no sentido de reduzir o efeito das ameaças levantadas.

A necessidade de definição de rotina de lavagem ou *flushing*, também apontada como uma oportunidade, visa prevenir ou desacelerar processos de colmatação da pedra brita, compensando de forma preventiva um ponto fraco apontado para o material.

O Quadro 19 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita para filtros percoladores.

Quadro 19 – Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Priorizar a utilização de pedra brita para filtros percoladores de baixa taxa	Utilizar pedra brita preferencialmente para filtros percoladores de baixa taxa (a literatura não exclui a possibilidade de utilização de pedra brita em filtros de alta taxa, porém os detalhes de projeto e as ações de operação e manutenção relacionadas à prevenção de colmatação devem ser fundamentalmente praticadas)
Estudar o uso combinado de filtros percoladores em alta e baixa taxa	Verificar a viabilidade do uso combinado de filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico dimensionados para o abatimento de carga orgânica seguidos de filtros percoladores em baixa taxa com pedra brita dimensionados para promover a nitrificação, aproveitando assim as melhores características dos dois materiais
Estabelecer padrão de qualidade da pedra brita a ser fornecida	Elaborar especificação que contemple, além da faixa granulométrica, outras características como tipo de rocha, porosidade, rugosidade, entre outras, enfatizando a necessidade de lavagem após peneiramento e a importância da ausência de pó de pedra
Elaborar projeto com filtro percolador apoiado, sem parede dupla	Permitir melhor fluxo de ar entre o meio suporte e o ambiente externo, principalmente para materiais com índice de vazios reduzido como as pedras

Quadro 19 – Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita (continuação)

Ação	Desdobramentos
Elaborar orçamento atualizado e preciso em etapa de projeto, com revisão em fase de licitação de obra	Considerar distância média de transporte da obra à jazida qualificada para fornecimento de material de qualidade, excluindo eventualmente jazidas mais próximas que não atendem aos requisitos mínimos de qualidade da pedra brita, evitando aditivos de valor em função do transporte do material da jazida ao local da obra
Fiscalizar obras de forma atuante e rígida	Exigir parâmetros de qualidade estabelecidos na especificação de projeto e desenvolver métodos padronizados aplicáveis à fiscalização da obra
Prever orçamento para lavagem da pedra brita antes da disposição no filtro	Padronizar a atividade de lavagem da pedra brita como obrigatória antes de inserir o material no interior do filtro para eliminar o pó de pedra, visando prevenir o filtro da colmatção ocasionada pelo pó de pedra
Prevenir processos de colmatção, formação de caminhos preferenciais e zonas mortas	Realizar operação e manutenção preventiva previstas e recomendadas para todos os processos a montante e para o meio suporte, visando à manutenção da alimentação uniforme em todo o volume de meio suporte, e definir rotina de lavagem ou <i>flushing</i> com base nas recomendações de literatura, adaptado à realidade operacional e ao crescimento do biofilme em cada ETE
Testar materiais semelhantes à pedra brita	Realizar busca e experimentos com outros materiais semelhantes à pedra brita para compor o meio suporte, tais como pedra lava, escória de alto forno, entre outros
Realizar ações periódicas de vistoria na rede coletora de esgoto	Vistoriar a rede coletora de esgoto periodicamente para identificar possíveis lançamentos irregulares que contenham quantidade excessiva de gorduras, atentando para vistoriar também se os empreendimentos ou residências possuem caixa de gordura adequada

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.6 Quanto ao meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado

##### 4.7.6.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Recomendado pela literatura o uso de meio suporte plástico estruturado para filtros percoladores de alta taxa de aplicação hidráulica e alta carga orgânica volumétrica obtidos a partir da vazão afluente à ETE normalmente somada à vazão de recirculação do efluente do filtro;
- Considerar se a rugosidade do material a ser utilizado como meio suporte é favorável à fixação e ao desenvolvimento do biofilme e especificar em projeto, se possível;
- Alto índice de vazios permite maior fluxo de ar para aeração natural, possibilitando o aumento da altura útil do meio suporte em até 12 m, implicando em um tempo

- de contato entre o líquido e a biomassa suficiente para promover maior degradação da matéria orgânica e para atingir níveis de nitrificação parcial e total;
- A maior área superficial específica resulta em maior área disponível por volume de meio suporte para o crescimento do biofilme, possibilitando redução de volume necessário ou aumento da taxa de aplicação hidráulica ou aumento da eficiência do tratamento;
  - Material com menor massa específica possibilita a utilização de elementos estruturais mais esbeltos, bem como soluções de projeto e materiais alternativos para a construção do filtro, visando redução de custo de implantação, compensando o fato de o preço de aquisição do material plástico ser superior ao da pedra brita;
  - Garantia de uniformidade do material, prevenindo ou até mesmo eliminando a formação de caminhos preferenciais, zonas mortas e colmatagem.

Para a etapa de implantação:

- Material com menor massa específica possibilita a utilização de estruturas mais esbeltas e a eliminação de elementos estruturais como a laje de drenagem perfurada, bem como permite a utilização de outras soluções construtivas e de materiais alternativos;
- Material com menor massa específica possibilita a utilização de estrutura mais esbelta e eliminação da laje perfurada para drenagem, reduzindo o volume de concreto armado na obra, refletindo em redução de custo de implantação, compensando o fato de o preço de aquisição do material plástico ser superior ao da pedra brita;
- Material com menor massa específica possibilita a utilização de estrutura mais esbelta e substituição da parede lateral com função estrutural por outro elemento de construção para simples vedação, reduzindo a utilização de concreto armado, refletindo em redução de custo de implantação, compensando o fato de o preço de aquisição do material plástico ser superior ao da pedra brita.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Aproveitamento da maior área superficial específica se utilizadas taxas de aplicação hidráulicas adequadas, refletindo no aumento da eficiência do tratamento para filtro em alta taxa;
- Alto índice de vazios desacelera ou mesmo elimina processos de colmatação;
- Alto índice de vazios favorece aeração natural;
- Alto índice de vazios pode representar redução de ações operacionais e de manutenção periódica como a prática da lavagem ou *flushing*.

#### 4.7.6.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Faixa de valores para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica definidos em literatura podem demandar validação ou revisão, estabelecendo valores para filtros com objetivo de remoção de matéria orgânica e para filtros com objetivo de remoção de matéria orgânica combinada à nitrificação, relacionando essas variáveis a outros fatores e variáveis de projeto como altura útil do meio suporte e recirculação;
- Filtros percoladores com meio suporte plástico não podem ser operados em regime de baixa taxa, pois o molhamento do meio suporte plástico fica comprometido, resultando em menor aproveitamento da área superficial específica disponível, tendo como consequência o baixo desenvolvimento do biofilme e os resultados de eficiência de tratamento aquém do esperado;
- Possibilidade de não verificação da rugosidade do material a ser utilizado como meio suporte quando do desenvolvimento do projeto, podendo prejudicar o desenvolvimento do biofilme.

Para a etapa de implantação:

- O valor de aquisição de material plástico estruturado é significativamente superior se comparado ao valor de aquisição da pedra brita, porém a utilização do meio suporte plástico estruturado pode implicar em outras características que resultem

em economia de obra ou compensação de custos e em facilidades de operação e manutenção.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Maior possibilidade de proliferação de moscas, vetores e caramujos em função do maior índice de vazios, ressaltando que os caramujos podem representar perda de eficiência do tratamento, uma vez que são predadores da biomassa responsável pela degradação da matéria orgânica e, principalmente, pela realização da nitrificação;
- Possibilidade de maior tempo de espera até a fixação e o desenvolvimento do biofilme em função da rugosidade do plástico;
- Menor aproveitamento da área superficial específica quando o filtro é operado em baixa taxa de aplicação hidráulica, refletindo em baixo crescimento do biofilme e eficiência aquém do esperado.

#### 4.7.6.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Interesse em utilizar novos materiais e novas soluções de engenharia;
- Desenvolvimento de mercado para ampliar as opções de fornecedores nacionais de meio suporte plástico estruturado;
- Desenvolvimento de estudos e experimentos dedicados à definição de faixas de valores recomendados para taxa de aplicação hidráulica e para carga orgânica volumétrica para filtros percoladores que objetivam a degradação da matéria orgânica e a nitrificação combinadas.

Para a etapa de implantação:

- Possibilidade de aumento da competitividade entre fornecedores no mercado, reduzindo o custo para aquisição do meio suporte plástico estruturado;
- Elaboração de estudos de caso para estabelecer criteriosamente uma relação *Capex* e *Opex* para filtros com pedra brita e filtros com meio suporte plástico

estruturado, considerando fatores que influenciam diretamente e indiretamente os custos de implantação, operação e manutenção.

#### 4.7.6.4 T (ameaças)

##### Para a etapa de implantação:

- Variação do custo do produto conforme a variação do câmbio e das taxas de importação.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- Descargas clandestinas com altos teores de gorduras, óleos e graxas na rede coletora de esgoto podem acelerar processos de obstrução, formação de caminhos preferenciais e colmatção do meio suporte.

#### 4.7.6.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Para o meio suporte plástico, vários pontos fortes apresentados estão diretamente relacionados às características físicas do material. A maior área superficial específica, o elevado índice de vazios e a uniformidade do material oferecem a possibilidade de aumento da eficiência de degradação da matéria orgânica e a realização de nitrificação de forma combinada no mesmo filtro, desde que estabelecidas as taxas de aplicação hidráulicas e cargas orgânicas volumétricas adequadas, isso porque é possível elevar a profundidade útil do meio suporte sem prejudicar a aeração natural já que o índice de vazios é da ordem de 97 %.

A maior área específica resulta em redução do volume útil total e o material mais leve implica em uma estrutura mais esbelta, com menos volume de concreto armado e possibilidade de novas soluções de fechamento lateral do filtro, sugerindo economia de custos de implantação ou, minimamente, sugerindo compensação do ponto fraco de alto custo do material plástico.

Por fim, todas estas características são favoráveis à operação quanto à minimização da colmatção e à maior eficiência do tratamento, desde que estabelecidas e praticadas as taxas de aplicação hidráulicas e cargas orgânicas



volumétricas adequadas ao meio suporte plástico e à área superficial específica disponível.

Todos estes pontos fortes vão ao encontro da oportunidade de utilizar novos materiais, modernizando o projeto e a obra de filtros percoladores.

Os pontos fortes do meio suporte plástico compensam os pontos fracos e apresentam vantagens em relação também aos pontos fracos da pedra brita, sugerindo que o plástico representa uma tendência de utilização. No entanto, a ameaça do meio suporte plástico relacionada à variação de custo em função das mudanças de câmbio e também da reduzida quantidade de fornecedores representam um risco que deve ser assumido, calculado e ponderado ainda em fase de projeto, minimizando impactos no orçamento da obra.

Por fim, há pontos fracos que podem ser previamente testados, validados e considerados quando da elaboração do projeto e das especificações. Tais pontos estão relacionados à formação, fixação e desenvolvimento do biofilme e podem ser verificados a partir da eficiência de molhamento, diretamente relacionada à taxa de aplicação hidráulica e à área superficial específica, bem como da carga orgânica volumétrica e da rugosidade do material plástico. O projeto deve assegurar que a taxa de aplicação hidráulica seja suficiente para obter eficiência de molhamento da área superficial específica oferecida pelo material plástico. Deve-se atentar ainda para verificações relacionadas à presença de moscas, caramujos e outros vetores, bem como deve-se especificar a rugosidade do material, suficiente para permitir a fixação e o desenvolvimento adequado da biomassa responsável pelo tratamento biológico. Caso contrário, a eficiência do tratamento pode ficar comprometida em função do baixo desenvolvimento do biofilme.

O Quadro 20 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte em pedra brita para filtros percoladores.

Quadro 20 – Ações e desdobramentos relacionados à utilização de meio suporte plástico estruturado

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Priorizar a utilização de plástico estruturado para filtros percoladores de alta taxa	Utilizar o plástico estruturado para filtros que objetivam receber altas taxas de aplicação hidráulica e altas cargas orgânicas volumétricas, não excluindo a possibilidade de realização de nitrificação no mesmo filtro, considerando a realização de recirculação
Estudar taxas de aplicação hidráulica para realização de nitrificação	Verificar taxas de aplicação hidráulica e faixas de operação adequadas para realização de nitrificação, considerando a realização de recirculação
Projetar filtros considerando a possibilidade de aumentar a altura útil do meio suporte em etapa futura	Prever incremento de altura útil do meio suporte para aumentar o volume total, aumentando a eficiência do tratamento
Estudar todos os aspectos e fatores que podem compor uma análise de viabilidade para utilização de meio suporte plástico estruturado	Levantar todos os aspectos significativos e que representam custos nas etapas de projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores para compor uma análise de viabilidade para utilização de meio suporte plástico estruturado
Estudar o uso combinado de filtros percoladores em alta e baixa taxa	Verificar a viabilidade do uso combinado de filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico dimensionados para o abatimento de carga orgânica seguidos de filtros percoladores em baixa taxa com pedra brita dimensionados para promover a nitrificação, aproveitando assim as melhores características dos dois materiais
Estabelecer padrão de qualidade do meio suporte plástico a ser fornecido	Elaborar especificação que contemple tipo de plástico, resistência estrutural e mecânica, rugosidade suficiente para aderência da biomassa, entre outras características físicas importantes para o funcionamento adequado
Utilizar soluções de construção inovadoras nos projetos	Considerar materiais e métodos construtivos alternativos que passam a ser aplicáveis quando se utiliza o meio suporte plástico estruturado, que permite estruturas mais esbeltas, eliminação de laje de drenagem e fechamento lateral com materiais leves
Prever ações para evitar a proliferação de moscas, vetores e caramujos	Realizar operação e manutenção preventiva recomendada para prevenir a proliferação de moscas, vetores e caramujos, sendo que a proliferação de caramujos inibe a nitrificação e requer especial atenção
Estudar o estabelecimento da biomassa e a manutenção da eficiência ao longo de anos de uso do filtro percolador com meio suporte plástico estruturado	Observar o tempo de formação e estabilização do biofilme e relacionar o comportamento da biomassa aos resultados de eficiência
Estudar o aproveitamento real obtido com o incremento de área superficial específica	Comparar área superficial específica e ganho de eficiência para obter resultados quanto ao aproveitamento real obtido com o ganho de área superficial específica do meio suporte plástico, sendo tais resultados importantes para compor uma análise de viabilidade de utilização do meio suporte plástico estruturado
Fomentar o desenvolvimento de materiais plásticos nacionais	Buscar possíveis desenvolvedores e fornecedores para produzir meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado visando fomentar a produção nacional e reduzir o custo de aquisição desse material, tornando o material mais viável economicamente e ambientalmente

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.7 Quanto ao sistema de distribuição de vazão afluyente ao filtro

##### 4.7.7.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Desenvolvimento das especificações técnicas do sistema de distribuição a partir das experiências de implantação, operação e manutenção;
- Especificação técnica e projeto mecânico devem adotar soluções simplificadas e exigir testes de pré-operação para promover distribuição homogênea e uniforme (TAH igual em qualquer ponto da superfície);
- Especificação técnica e projeto mecânico devem adotar soluções simplificadas e materiais adequados para evitar a corrosão do sistema de distribuição (sistema de aeração simplificado ou cascadeamento para provocar o desprendimento dos gases, captação e tratamento dos gases corrosivos e odoríferos a montante do filtro percolador e todas as partes e componentes da caixa e do sistema resistentes à corrosão);
- Especificação técnica e projeto hidráulico e mecânico devem estabelecer mecanismos diversos para manter a velocidade de rotação constante (controle de vazão de recirculação em função da vazão afluyente à ETE para promover vazão afluyente ao filtro constante; controle da velocidade de rotação com motor com inversor de frequência visando manutenção da velocidade de rotação constante quando submetido a variações de vazão);
- Especificação técnica e projeto hidráulico devem estabelecer taxas hidráulicas e periodicidade para realização de lavagem ou *flushing* do meio suporte;
- Especificação técnica do sistema de distribuição elaborada observando tais critérios de qualidade reflete em um equipamento adequado que minimiza ou elimina a maioria dos problemas de operação e manutenção verificados nas ETES visitadas no Paraná;
- Projeto deve prever gradeamento fino ou peneira estática instalada logo a montante do filtro (além do gradeamento ou peneiramento fino instalado no sistema preliminar), para minimizar sólidos que provocam entupimento do sistema de distribuição do filtro.

Para a etapa de implantação:

- Fiscalização de obra rigorosa e cumprimento dos testes de pré-operação previstos nas especificações técnicas quando do recebimento dos equipamentos, observando tais critérios de qualidade reflete em um equipamento adequado que minimiza ou elimina a maioria dos problemas de operação e manutenção verificados nas ETEs visitadas no Paraná.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Bom funcionamento e eficiência do tratamento dependem do cumprimento de atividades simples de operação e manutenção (limpeza dos orifícios e do braço distribuidor);
- Bom funcionamento e eficiência do tratamento dependem de soluções simplificadas de projeto e do cumprimento das especificações quando em fase de implantação para promover distribuição uniforme e homogênea e velocidade de rotação constante;
- Não demanda operação 24 h.

4.7.7.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Sistema demanda o emprego de materiais resistentes à corrosão (ambiente propício à corrosão, devido ao  $H_2S$  proveniente do tratamento anaeróbio);
- Sistema fabricado com materiais não adequados resulta em corrosão e problemas quanto à manutenção da velocidade de rotação e quanto à alimentação e crescimento adequado do biofilme;
- Atualmente os sistemas verificados na maioria das ETEs não possui soluções para promover a distribuição uniforme e homogênea, refletindo em alguns casos na eficiência aquém do esperado para o filtro (soluções para atingir o cenário ideal quanto à distribuição uniforme e homogênea são simplificadas e demandam ações pontuais corretivas e fáceis de serem implementadas).

Para a etapa de implantação:

- Demanda o emprego de materiais resistentes à corrosão devido ao H<sub>2</sub>S produzido pelo tratamento anaeróbio a montante, refletindo no aumento do valor de aquisição desses materiais, peças e equipamentos;
- Demanda fiscalização de obra qualificada e rígida quanto ao fornecimento e recebimento de materiais e equipamentos resistentes à corrosão, podendo ser solicitado apoio técnico de especialistas em materiais para conferir a resistência do material a ambientes corrosivos.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Falhas de especificação, de projeto ou de obra referente aos processos a montante do filtro ou referentes ao próprio sistema de distribuição do filtro podem refletir em problemas operacionais como entupimento, corrosão e falhas de funcionamento do sistema de distribuição, influenciando a eficiência do filtro percolador;
- Falhas de operação e manutenção nos processos a montante do filtro podem refletir em problemas operacionais como entupimento, corrosão e falhas de funcionamento do sistema de distribuição, influenciando a eficiência do filtro percolador.

#### 4.7.7.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Desenvolvimento de especificações técnicas contemplando todas as exigências necessárias para garantir qualidade e durabilidade do material, das peças e dos equipamentos;
- Desenvolvimento de especificações técnicas contemplando todas as exigências necessárias para garantir a distribuição uniforme e homogênea do afluente ao filtro;
- Possibilidade de desenvolver soluções variadas, adequadas às demandas para melhoria de filtros existentes ou para implantação de novos filtros.

Para a etapa de implantação:

- Fiscalização da obra deve exigir que o fornecedor realize testes de pré-operação no equipamento.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Estabelecer procedimentos padrão para operação e manutenção preventiva do sistema de distribuição afluyente ao filtro percolador.

#### 4.7.7.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Podem ocorrer problemas de operação em função de falhas de concepção, de projeto ou de obra, tanto referente aos processos a montante do filtro quanto referente ao próprio sistema de distribuição;
- Descargas clandestinas com altos teores de gorduras, óleos e graxas na rede coletora de esgoto podem acelerar processos de obstrução e entupimento do sistema de distribuição.

#### 4.7.7.5 Análise cruzada da Matriz SWOT e indicação de ações para melhorias

Considerando que a forma como é realizada a distribuição do afluyente define a alimentação e o desenvolvimento da biomassa responsável pelo tratamento, pode-se apontar o sistema de distribuição do afluyente como a principal parte componente do filtro, sendo que o mau funcionamento dessa parte, seja quanto à corrosão, rotação, distribuição uniforme e homogênea, taxa de aplicação hidráulica, entre outros aspectos, pode comprometer a eficiência do filtro.

Para todos os pontos fracos elencados foram apontadas soluções diretas, seja a partir dos pontos fortes ou das oportunidades, sendo que todos podem ser abordados e detalhados nas especificações técnicas elaboradas em fase de projeto, contemplando soluções simples e que vão ao encontro do conceito simplificado de funcionamento dos filtros percoladores.



Quanto à rotina de operação e manutenção preventiva, a elaboração de um material que oriente e apresente diretrizes é descrita como uma oportunidade que supre pontos fracos e ameaças relacionadas à falta dessa prática e que induz à padronização para a operação e a manutenção de filtros percoladores.

O Quadro 21 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados ao sistema de distribuição afluyente aos filtros percoladores.

Quadro 21 – Ações e desdobramentos relacionados ao sistema de distribuição afluyente ao filtro

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Elaborar especificação detalhada para prevenir corrosão	Contemplar exigências e soluções que eliminam os problemas verificados nesse estudo quanto à corrosão do sistema de distribuição uniforme, incluindo material de fabricação dos equipamentos e peças, bem como soluções para captura e tratamento dos gases corrosivos
Elaborar especificação detalhada para manutenção da velocidade de rotação	Contemplar exigências e soluções que eliminam os problemas verificados nesse estudo quanto à velocidade de rotação, incluindo a manutenção da vazão afluyente ao filtro constante e a especificação de motor no sistema de distribuição para compensar a força hidráulica em situações de variação da vazão afluyente, mantendo a velocidade de rotação sempre constante
Elaborar especificação detalhada para homogeneidade na distribuição	Contemplar exigências e soluções que eliminam os problemas verificados nesse estudo, incluindo soluções de projeto, testes de pré-operação e práticas de operação e manutenção
Prever pré-operação assistida pelo fornecedor do sistema de distribuição	Elaborar item na especificação comprometendo o cumprimento das especificações e a garantia de funcionamento pelo fornecedor através da pré-operação assistida
Substituir os sistemas com problemas em ETEs em operação	Utilizar a especificação elaborada para aquisição de novos sistemas e prever a implantação de todas as soluções necessárias para eliminar problemas que prejudicam o funcionamento adequado do sistema de distribuição apresentadas e discutidas
Estabelecer rotina de operação e manutenção preventiva	Utilizar as experiências relatadas nesse estudo para elaborar boas práticas de operação e manutenção preventiva
Aplicar PDCA na revisão da rotina de operação e manutenção preventiva	Utilizar as experiências atuais de operação para revisar boas práticas de operação e manutenção preventiva

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.8 Quanto à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica

##### 4.7.8.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- O dimensionamento deve considerar as faixas de valores sugeridos em literatura, tanto para taxa de aplicação hidráulica quanto para carga orgânica volumétrica;

- A taxa de aplicação hidráulica deve ser utilizada nas equações de dimensionamento do volume total necessário, de acordo com a eficiência desejada;
- A carga orgânica volumétrica é utilizada como variável de conferência após o dimensionamento dos filtros percoladores;
- Caso os valores resultantes não estejam de acordo com as faixas sugeridas pela literatura, tanto a taxa de aplicação hidráulica quanto a carga orgânica volumétrica podem ser ajustadas, sendo necessário revisar os cálculos de dimensionamento e refazer a comparação dos resultados com os valores sugeridos em literatura, visando atender o objetivo de eficiência proposto.

Para a etapa de operação e manutenção:

- A operação pode variar a taxa de aplicação hidráulica de acordo com a vazão afluyente e a necessidade de adequações operacionais, atentando para as recomendações e faixas de valores sugeridas conforme o objetivo do filtro.

#### 4.7.8.2 *W* (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Se mal atribuída em projeto, a taxa de aplicação hidráulica interfere diretamente na eficiência do tratamento.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Se mal regulada em projeto, a taxa de aplicação hidráulica interfere diretamente na eficiência do tratamento.

#### 4.7.8.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Revisão das faixas de valores atribuídas ao meio suporte em pedra brita, considerando que a amplitude das faixas de valores apresentadas em literatura é grande;
- Revisão e determinação das faixas de valores atribuídas ao meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado conforme o objetivo do filtro (degradação de matéria orgânica ou degradação de matéria orgânica e nitrificação), considerando que a literatura apresenta apenas valores para “alta taxa”;
- Realizar pesquisas e experimentos em escala reduzida e em escala operacional visando à revisão das faixas de valores sugeridas em literatura.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Realizar testes operacionais variando a taxa de aplicação hidráulica visando verificar valores ótimos adequados a peculiaridades de cada ETE ou de uma região.

#### 4.7.8.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Variações significativas da concentração do afluente à ETE podem alterar a carga orgânica volumétrica praticada, implicando em alteração do funcionamento do filtro ou em impactos quanto à eficiência do filtro.

#### 4.7.8.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Os pontos fortes estão relacionados às recomendações para que seja realizado um dimensionamento adequado dos filtros percoladores, enquanto os pontos fracos estão relacionados ao não cumprimento ou não atendimento de tais requisitos mínimos.

Assim como o sistema de distribuição do filtro, a taxa de aplicação hidráulica define o desenvolvimento e a atuação da biomassa no tratamento, sendo a eficiência

do filtro totalmente dependente dessa variável. Assim, as ações e as práticas apontadas para melhorias do sistema de distribuição podem ser relacionadas também às ações e às práticas referentes à taxa de aplicação hidráulica.

A ameaça operacional elencada está relacionada à alteração da carga orgânica afluente à ETE, efeito que poderia ser verificado a longo prazo, ou por um lançamento atípico, ou ainda por um novo cliente que lança efluente industrial ou de produção alimentícia na rede coletora de esgoto. Cada uma dessas situações demanda ações específicas diferenciadas como estudo populacional e estudo da alteração de hábitos que possam provocar o aumento expressivo da carga orgânica afluente, ações de vistoria da rede de coleta de esgoto, readequação do processo de tratamento, entre outras.

O Quadro 22 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica.

Quadro 22 – Ações e desdobramentos relacionados à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica

Ação	Desdobramentos
Estudar taxas de aplicação hidráulica para meio suporte plástico	Elaborar estudos teóricos e experimentais para validar ou revisar taxas de aplicação hidráulica e faixas de operação atribuídas aos diferentes materiais plásticos empregados como meio suporte, estabelecendo faixas operacionais em função do objetivo do filtro, para degradação de matéria orgânica e para realização de nitrificação, e em função da área superficial específica, da eficiência de molhamento e da rugosidade do material
Aplicar taxas e cargas compatíveis com o objetivo do filtro e com o meio suporte empregado	Revisar taxas e cargas praticadas atualmente nas ETEs em operação e realizar adequações quando necessário, realizando a recirculação, por exemplo, bem como atentar para a definição dessas variáveis em etapa de projeto

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.9 Quanto ao desenvolvimento do biofilme

##### 4.7.9.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Prever soluções para manutenção da taxa de aplicação hidráulica constante, uniforme e homogênea, visando propiciar situação ideal para o desenvolvimento adequado do biofilme;

- Considerar se a rugosidade do material a ser utilizado como meio suporte é favorável à fixação e ao desenvolvimento do biofilme e especificar em projeto, se possível;
- Estimar a eficiência de molhamento do meio suporte a partir da verificação da área superficial específica do material a ser utilizado como meio suporte, da taxa de aplicação hidráulica e da carga orgânica volumétrica, visando o bom aproveitamento da área superficial específica disponível.

Para a etapa de implantação:

- A fiscalização da obra deve verificar a rugosidade do material, caso conste padrão de referência ou exigência referente a esta variável em projeto e em especificação técnica.

Para a etapa de operação e manutenção:

- O crescimento do biofilme depende significativamente da taxa de aplicação hidráulica e da carga orgânica volumétrica, variáveis de fácil monitoramento e que auxiliam eventuais diagnósticos de operação;
- Operação deve garantir taxa de aplicação hidráulica uniforme e homogênea para propiciar condições adequadas para o desenvolvimento do biofilme.

#### 4.7.9.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Possibilidade de não verificação da rugosidade do material a ser utilizado como meio suporte quando do desenvolvimento do projeto, podendo prejudicar o desenvolvimento do biofilme;
- Possibilidade de não verificação da eficiência de molhamento do meio suporte quando do desenvolvimento do projeto, podendo prejudicar o desenvolvimento do biofilme.

Para a etapa de implantação:

- Falhas na fiscalização e verificação da qualidade do material a ser utilizado como meio suporte podem comprometer o desenvolvimento do biofilme;
- Falhas na fiscalização e verificação da qualidade dos equipamentos e peças que compõem o sistema de distribuição do afluente ao filtro podem comprometer a alimentação e o desenvolvimento do biofilme;
- Investimentos elevados em materiais plásticos alternativos que não atendam requisitos mínimos de qualidade e resistência e não ofereçam características mínimas para o desenvolvimento do biofilme e para o bom funcionamento do filtro.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Taxas de aplicação hidráulica superiores às estabelecidas em projeto podem impedir o desenvolvimento do biofilme, por estabelecer uma situação de lavagem ou *flushing*;
- Taxas de aplicação hidráulica muito inferiores às estabelecidas em projeto podem restringir o desenvolvimento do biofilme, por falta de alimento para os micro-organismos;
- Inspeção visual da situação do biofilme só é possível na camada mais superior do filtro (para visualizar camadas abaixo da superficial, é necessário remover o meio suporte).

#### 4.7.9.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Estabelecer padrão de referência ou exigência referente à rugosidade do material, visando favorecer a fixação e o crescimento do biofilme;
- Considerar para a concepção de projetos os novos materiais recentemente desenvolvidos e testados em escala reduzida e em escala operacional no Brasil, que oferecem características interessantes para o bom desenvolvimento do biofilme, com resultados comprovados por meio de pesquisas dedicadas, como o



meio suporte plástico de fluxo cruzado e o meio suporte plástico estruturado preenchido com espuma de poliuretano.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Realizar testes operacionais que possibilitem adequar a taxa de aplicação hidráulica visando o melhor desenvolvimento do biofilme.

#### 4.7.9.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Eventos de lançamentos industriais clandestinos com produtos químicos variados na rede coletora de esgoto podem prejudicar ou mesmo comprometer o crescimento biológico, sendo necessário realizar inspeções e vistorias na rede para identificar o lançamento irregular, bem como realizar lavagem do meio suporte e reestabilização biológica da biomassa para desenvolvimento do biofilme.

#### 4.7.9.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

O desenvolvimento do biofilme é totalmente dependente da aeração natural e do fluxo de ar no interior do filtro e da alimentação do filtro, sendo a rugosidade do material, a taxa de aplicação hidráulica, a carga orgânica volumétrica e o funcionamento do sistema de distribuição os principais fatores condicionantes para o desenvolvimento adequado da biomassa responsável pelo tratamento aeróbio.

Ao discutir tais fatores condicionantes, é importante destacar as características de projeto e a correta execução da obra visando atendimento aos requisitos mínimos para promover bom funcionamento do filtro percolador, incluindo fluxo de ar no interior do filtro, promoção da distribuição uniforme e homogênea do afluente, qualidade dos materiais empregados como meio suporte e materiais utilizados para fabricação do sistema de distribuição e peças componentes, aplicação da taxa hidráulica e da carga orgânica adequadas ao objetivo do filtro e ao meio suporte utilizado, eficiência de molhamento da área superficial específica, e práticas de operação e manutenção adequadas, incluindo a lavagem periódica do meio suporte, entre outras atividades de limpeza e desobstrução do sistema de distribuição.

Os pontos fracos levantados permeiam todos os fatores supracitados e já discutidos em outros itens e podem ser trabalhados, prevenidos e evitados com verificações de projeto, fiscalização adequada de obra e atividades simples de operação e manutenção, apontadas como pontos fortes e oportunidades, visando manter a adequada alimentação da biomassa e o esperado desenvolvimento do biofilme.

O Quadro 23 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados ao desenvolvimento do biofilme.

Quadro 23 – Ações e desdobramentos relacionados ao desenvolvimento do biofilme

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Promover o fluxo de ar e a aeração adequada no interior do filtro	Atentar em etapa de projeto para todas as exigências apresentadas em norma e na literatura para promover o fluxo de ar, bem como em etapa de obra para o cumprimento e a correta execução de tais exigências
Especificar a rugosidade adequada do material	Detalhar em especificação de projeto a rugosidade adequada do material empregado como meio suporte para facilitar a fixação e o desenvolvimento do biofilme no meio suporte
Definir a taxa de aplicação hidráulica e a carga orgânica volumétrica adequadas ao objetivo do filtro e ao meio suporte empregado	Definir em etapa de projeto e verificar em etapa de operação as variáveis taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica conforme o objetivo do filtro e conforme as características do meio suporte, principalmente em função da área superficial específica do meio suporte empregado
Adotar soluções para promover a distribuição afluente ao filtro de forma adequada	Promover a distribuição do afluente ao filtro de forma homogênea e uniforme, adotando as soluções de projeto citadas, realizando a fiscalização e as verificações necessárias em etapa de obra e executando as atividades previstas de operação e manutenção recomendadas visando a adequada alimentação da biomassa para obter o desenvolvimento do biofilme e a eficiência esperada para o tratamento
Considerar a eficiência molhamento em etapa de projeto	Compatibilizar a taxa de aplicação hidráulica e a área superficial específica do meio suporte de forma a estimar a eficiência de molhamento do meio suporte ainda em etapa de projeto, considerando que o desenvolvimento do biofilme é resultado dessa compatibilização
Realizar as práticas de operação e manutenção conforme recomendações teóricas e experiências práticas observadas e relatadas	Monitorar todas as variáveis que influenciam o desenvolvimento do biofilme, atentando para o cumprimento das práticas de operação e manutenção recomendadas, como a uniformidade e homogeneidade da taxa de aplicação hidráulica ao longo de toda a superfície do filtro, bem como as atividades periódicas de vistoria, limpeza e desobstrução do sistema de distribuição e de lavagem do meio suporte.

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.10 Quanto à lavagem do meio suporte e controle do crescimento do biofilme

##### 4.7.10.1 S (pontos fortes)

###### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Método para cálculo de lavagem ou *flushing* com revisões recentes apresentado pela literatura;
- Projeto deve apresentar indicação da taxa hidráulica a ser aplicada para realização periódica de lavagem e recomendações de como deve ser realizado o procedimento, incluindo velocidade de rotação do sistema de distribuição, periodicidade de realização, entre outros, podendo variar conforme o meio suporte;
- Não demanda projeto ou especificações de equipamentos adicionais para realizar a lavagem;
- Decantador secundário é essencial para conter os sólidos desprendidos do meio suporte quando da realização da lavagem periódica do meio suporte.

###### Para a etapa de implantação:

- Não demanda implantação de estrutura ou instalação de equipamentos adicionais para realizar a lavagem.

###### Para a etapa de operação e manutenção:

- Procedimento de realização da lavagem é simplificado, apenas com a redução da velocidade de rotação de tal forma a atingir a taxa de aplicação hidráulica recomendada;
- Operação pode adequar ou recalcular a taxa hidráulica a ser aplicada para promover a lavagem, em função da necessidade verificada a partir do crescimento do biofilme;
- Ainda que não tenha sido prevista a prática de lavagem na etapa de concepção e no detalhamento do projeto e do manual de operação da ETE, a operação pode definir a frequência e as taxas hidráulicas a serem aplicadas para lavagem e

realizar o procedimento apenas desacelerando a rotação do sistema de distribuição por um intervalo de tempo.

#### 4.7.10.2 W (pontos fracos)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projetos não estabelecem a taxa de aplicação hidráulica para realização de lavagem.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- Depende de a operação realizar o procedimento de forma correta e com periodicidade adequada, sendo que frequências superiores ou inferiores à demanda real prejudicam o desenvolvimento do biofilme;
- A lavagem não deve ser realizada com hidro jateamento (situação verificada em algumas ETEs visitadas);
- Lavagem excessiva pode retirar a biomassa e causar redução da eficiência por ausência da biomassa e por perda de sólidos no efluente do filtro;
- Necessidade de planejamento e definição de rotina de operação e manutenção preventiva.

#### 4.7.10.3 O (oportunidades)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Prever no projeto a frequência de lavagem e a taxa de aplicação hidráulica de lavagem;
- Desenvolver especificação técnica de sistema automatizado para lavagem, com redução da velocidade de rotação de forma programada.

#### 4.7.10.4 T (ameaças)

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- A variação da vazão afluente ao filtro e a falta de controle da vazão afluente, da taxa de aplicação hidráulica e da velocidade de rotação do sistema de distribuição podem resultar na alimentação inadequada do afluente ao filtro, provocando uma situação de lavagem não programada e inadequada que prejudica o desenvolvimento do biofilme e a eficiência do filtro.

#### 4.7.10.5 Análise cruzada da Matriz SWOT e indicação de ações para melhorias

O fato de esta prática de lavagem não depender de projeto, equipamentos e obras adicionais é um ponto favorável. Os pontos fracos são apontados a partir da dependência que este processo tem com a operação, ou seja, a lavagem depende totalmente da programação de operação e manutenção adequadas. Para tal, a oportunidade visualizada nesse aspecto é o planejamento e a elaboração de um plano de rotina de operação e manutenção preventiva associado a treinamentos para a equipe de operação para que os pontos fracos de operação sejam minimizados com uma ação realizada ainda em fase de projeto e em fase de operação inicial, pós obra.

A ameaça apontada está relacionada ao controle da vazão afluente, taxa de aplicação hidráulica e velocidade de rotação do sistema de distribuição. O presente estudo aborda tais aspectos, apresentando também pontos fortes e fracos, oportunidades e ameaças, sendo as ações e soluções propostas simplificadas e de fácil aplicação.

O Quadro 24 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à lavagem do meio suporte e controle do crescimento do biofilme.

Quadro 24 – Ações e desdobramentos relacionados à lavagem do meio suporte e controle do crescimento do biofilme

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Apresentar cálculos e recomendações referentes à lavagem do meio suporte em etapa de projeto	Prever taxas de aplicação hidráulica, velocidade de rotação e frequência da execução do procedimento de lavagem do meio suporte em etapa de projeto, conforme o objetivo do filtro e conforme o meio suporte empregado, apresentando as recomendações necessárias para que a operação possa executar adequadamente tal procedimento
Estabelecer rotina de operação e manutenção preventiva	Utilizar as experiências relatadas nesse estudo para elaborar e aplicar boas práticas de operação e manutenção preventiva
Desenvolver sistema programado para automatizar a realização da lavagem	Programar sistema operacional para que a vazão afluente ao filtro, composta pela soma entre a vazão afluente à ETE e a vazão de recirculação, a taxa de aplicação hidráulica e a velocidade de rotação sejam controladas visando à operação adequada e a execução da lavagem periódica de forma automatizada
Projetar e operar adequadamente o decantador secundário	Projetar e operar o decantador secundário prevenindo cargas eventuais maiores provenientes da lavagem do meio suporte do filtro e do desprendimento de sólidos e de parte da biomassa
Realizar verificações operacionais para validar ou adequar as variáveis pertinentes à lavagem do meio suporte	Verificar em etapa de operação as variáveis que influenciam a realização da lavagem do meio suporte, incluindo vazão afluente, taxa de aplicação hidráulica, velocidade de rotação do sistema de distribuição e frequência e duração do procedimento de lavagem, validando as orientações de projeto e realizando adequações a partir da experiência operacional local
Eliminar situações de lavagem não programadas	Eliminar falhas de projeto, obra ou operação que resultam ou refletem em situações de lavagem não programada, como variação da vazão afluente, variação da velocidade de rotação do sistema de distribuição, entre outras, eliminando impactos negativos ao desenvolvimento do biofilme e à eficiência do tratamento

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.11 Quanto à colmatção e substituição do meio suporte

##### 4.7.11.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projeto deve considerar processos unitários a montante que retirem sólidos e gorduras do afluente ao filtro percolador, incluindo gradeamento médio e fino, desarenador e processo para separação de gorduras, óleos e graxas;
- Definição e especificação de material a ser utilizado como meio suporte que ofereça características que previnem ou minimizam a colmatção;
- Definição de parâmetros de projeto e de taxas de operação e de lavagem que minimizam a colmatção;



- Elaborar manual de operação em fase de projeto recomendando a lavagem periódica e outras práticas de limpeza e manutenção preventiva;
- Para substituir o meio suporte em pedra brita por meio suporte plástico estruturado, deve ser realizado novo dimensionamento, utilizando as estruturas existentes e conferindo exigências e parâmetros de projeto para o funcionamento adequado dos filtros com plástico, incluindo taxas hidráulicas e carga orgânica volumétrica aplicadas, altura do meio suporte, entre outros parâmetros operacionais, e verificação de perda de carga nas tubulações afluentes aos filtros.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Prevenção da colmatção depende do cumprimento de atividades simples de operação e manutenção do sistema preliminar, incluindo a retirada de resíduos do gradeamento e do desarenador na etapa preliminar de tratamento, bem como a retirada de gorduras;
- Prevenção da colmatção depende do cumprimento de atividades simples de operação e manutenção do reator anaeróbio, incluindo o descarte periódico do lodo excedente e a retirada periódica de espuma;
- Prevenção da colmatção depende do cumprimento de atividades simples de operação e manutenção do filtro percolador, incluindo a limpeza e a desobstrução dos orifícios e do braço distribuidor, a retirada dos sólidos e a lavagem periódica do meio suporte;
- Operações simplificadas que demandam apenas treinamento dos operadores quanto aos procedimentos padrão e que não demandam mão de obra 24 h.

#### 4.7.11.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Especificação do material a ser utilizado como meio suporte ainda demanda melhorias.

Para a etapa de implantação:

- Recebimento, aprovação e liberação do material a ser utilizado como meio suporte ainda demanda definição de procedimento padrão a ser seguido pela fiscalização da obra.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Falhas de operação e manutenção nos processos a montante do filtro (gradeamento, desarenador, reator anaeróbio) podem comprometer o sistema de distribuição do filtro e podem acelerar a colmatação do meio suporte;
- Depende das ações preventivas da operação e da manutenção no filtro e nos demais processo a montante;
- Necessidade de planejamento e definição de rotina de operação e de manutenção preventiva.

4.7.11.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Buscar fornecedores qualificados e materiais alternativos com alto índice de vazios a serem utilizados como meio suporte visando à eliminação de um ambiente propício à colmatação.

Para a etapa de implantação:

- Elaborar procedimento e desenvolver equipamentos que auxiliem a fiscalização da obra a identificar divergências quanto à granulometria da pedra brita, uma vez que volumes com granulometria inferior à recomendada e o pó de brita são fatores que aceleram a colmatação do filtro.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Verificar em outras companhias de saneamento a existência de procedimentos efetivos para evitar a colmatção do meio suporte dos filtros percoladores.

4.7.11.4 T (ameaças)

Para a etapa de implantação:

- Fornecedores que oferecem materiais de baixa qualidade para meio suporte, como a pedra brita proveniente de rochas porosas ou sedimentares ou que não atendem a granulometria especificada, colaborando com processos de colmatção do filtro;
- Fornecedores que oferecem materiais de baixa qualidade para o meio suporte, como o meio suporte plástico estruturado que não apresenta resistência estrutural ao peso próprio do plástico e da biomassa aderida ou que não apresenta resistência mecânica a cargas pontuais na superfície do filtro, sendo amassados e colaborando com processo de colmatção do filtro.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Descargas clandestinas com altos teores de óleos, gorduras e graxas podem acelerar processos de colmatção.

4.7.11.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

A colmatção do meio suporte pode ser acelerada ou evitada a partir de escolhas de projeto, verificações de qualidade do material em obra e de ações de operação e de manutenção preventiva adequadas.

A especificação do material a ser utilizado requer atenção especial, sendo necessário para a pedra abordar porosidade, tipo de rocha e ausência de materiais de granulometria diferente da especificada, inclusive ausência de pó de pedra. Para materiais plásticos, é importante abordar a resistência estrutural necessária para suportar a biomassa e a resistência mecânica na camada superior para que seja possível caminhar sobre o meio suporte para realizar procedimentos de manutenção

e limpeza do sistema de distribuição, entre outras especificações que visem o não amassamento e a não colmatação.

Neste item também é apontada a necessidade de definição de rotina de operação e manutenção preventiva, incluindo lavagem do meio suporte, limpeza do sistema de distribuição, entre outros procedimentos nos demais processos a montante do filtro, desde a limpeza do gradeamento até a retirada de lodo e de espuma do reator anaeróbio. Estas práticas reduzem a possibilidade de colmatação do meio suporte, prolongam a vida útil do filtro e auxiliam à manutenção da eficiência desejada.

O Quadro 25 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à colmatação e substituição do meio suporte.

Quadro 25 – Ações e desdobramentos relacionados à colmatação e à substituição do meio suporte

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Reduzir a quantidade de sólidos grosseiros no afluente ao filtro percolador	Implantar gradeamento ou peneiramento fino no sistema preliminar e peneira estática a montante do filtro percolador
Reduzir a quantidade de gordura no afluente ao filtro percolador	Implantar sistema para retirada de gordura no sistema preliminar e / ou a montante do filtro percolador e sistema eficiente para retenção e remoção de espuma no reator anaeróbio
Realizar o descarte de lodo do reator anaeróbio periodicamente	Descartar o lodo do reator anaeróbio de forma a não provocar a perda de sólidos no efluente do reator
Realizar atividades de limpeza e manutenção nas etapas a montante do filtro percolador	Realizar limpeza e manutenção preventiva no sistema preliminar, nos reatores anaeróbios e no sistema de distribuição do afluente do filtro percolador
Combater a colmatação em sistemas existentes	Remover e lavar meio suporte, atentando para a carga de sólidos que poderá ser encaminhada ao decantador secundário
Estabelecer rotina de operação e manutenção preventiva	Utilizar as experiências relatadas para elaborar boas práticas de operação e manutenção preventiva, de acordo com a realidade operacional de cada ETE

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.12 Quanto à eficiência de molhamento do meio suporte

##### 4.7.12.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projeto deve contemplar soluções simplificadas que promovam a distribuição uniforme e homogênea em toda a superfície do meio suporte;
- Taxas de aplicação hidráulica devem ser compatíveis com o objetivo do filtro, seja apenas de remoção de matéria orgânica ou de remoção de matéria orgânica e nitrificação combinados;

- Taxas de aplicação hidráulica devem ser compatíveis com a área superficial específica e com o material empregado como meio suporte;
- O projeto deve estimar a eficiência de molhamento do meio suporte a partir da verificação da área superficial específica do material empregado como meio suporte, da taxa de aplicação hidráulica e da carga orgânica volumétrica, visando o bom aproveitamento da área superficial específica disponível.

Para a etapa de implantação:

- A fiscalização da execução dos mecanismos que promovem a distribuição uniforme e homogênea do afluente na superfície do meio suporte é fundamental para garantir que tais soluções projetadas foram executadas e contribuirão para a eficiência de molhamento do meio suporte;
- A fiscalização da obra pode exigir testes e pré-operação do sistema de distribuição para conferir se a distribuição está uniforme e homogênea.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Operação deve manter condições adequadas para distribuição uniforme e homogênea;
- Taxas de aplicação hidráulica devem ser compatíveis com o objetivo do filtro, com a área superficial específica do meio suporte e podem ser ajustadas;
- A eficiência de molhamento pode ser subjetivamente estimada pela presença e aspecto do biofilme na superfície do meio suporte, sendo facilmente identificável a deficiência de molhamento com ausência ou baixo desenvolvimento do biofilme por inspeção visual.

#### 4.7.12.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- O projeto deve conferir a eficiência de molhamento, atentando para situações em que o meio suporte apresente área superficial específica alta e a taxa de aplicação hidráulica seja baixa, resultando em baixa eficiência de molhamento do meio suporte.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Eficiência de molhamento baixa resulta em baixo desenvolvimento do biofilme e eficiência aquém do esperado.

#### 4.7.12.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Elaborar estudos dedicados para verificar as melhores combinações de área superficial específica e taxa de aplicação hidráulica, monitorando a eficiência de molhamento e os resultados obtidos.

Para a etapa de implantação:

- Estabelecer como padrão a realização de testes para verificar a uniformidade e homogeneidade da distribuição da vazão afluyente ao filtro e para verificar a eficiência de molhamento do meio suporte.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Elaborar estudos dedicados para monitoramento das taxas de aplicação hidráulica em diferentes materiais com áreas superficiais específicas distintas, monitorando a eficiência de molhamento e os resultados obtidos.

#### 4.7.12.4 T (ameaças)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Situações em que o projeto não compatibiliza as variáveis taxa de aplicação hidráulica e área superficial específica conforme o meio suporte e o objetivo do tratamento podem resultar em baixa eficiência de molhamento, baixo desenvolvimento do biofilme e eficiência aquém do esperado;
- Situações em que é realizada a troca do meio suporte de pedra brita para plástico, aumentando significativamente a área superficial específica disponível para



crescimento do biofilme, sem revisar o dimensionamento do filtro, sem aumentar a taxa de aplicação hidráulica e sem prever a recirculação do efluente do filtro podem resultar em baixa eficiência de molhamento, baixo desenvolvimento do biofilme e eficiência aquém do esperado.

#### 4.7.12.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Os pontos fortes e as oportunidades mencionadas previnem ou mesmo eliminam os pontos fracos e as ameaças levantadas a partir de verificações e conferências teóricas e práticas das variáveis que influenciam a eficiência de molhamento e, conseqüentemente a eficiência do tratamento realizado no filtro percolador.

O Quadro 26 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à eficiência de molhamento do meio suporte.

Quadro 26 – Ações e desdobramentos relacionados à eficiência de molhamento do meio suporte

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Prever soluções simplificadas que promovam a distribuição do afluente de forma adequada	Contemplar em projeto as soluções apresentadas para promover a distribuição uniforme e homogênea, visando o melhor aproveitamento da área superficial específica disponível e a melhor eficiência de molhamento do meio suporte
Compatibilizar a área superficial específica do meio suporte e a taxa de aplicação hidráulica	Verificar a compatibilidade entre a área superficial específica oferecida pelo meio suporte e a taxa de aplicação hidráulica para que esta seja adequada e promova a distribuição de forma a obter eficiência de molhamento da superfície disponível
Conferir as variáveis área superficial específica e taxa de aplicação hidráulica quando da realização de troca do meio suporte em ETEs existentes em etapa de projeto	Conferir se o projeto considerou a alteração da taxa de aplicação hidráulica em função do aumento da área superficial específica quando da troca de pedra brita para meio suporte plástico estruturado em ETEs em operação, prevendo a verificação da razão de recirculação e adequando tais variáveis para garantir a eficiência de molhamento
Realizar testes de pré-operação	Realizar testes de pré-operação em fase final de obra para verificar a eficiência de molhamento do meio suporte empregado
Estudar combinações ideais entre área superficial específica e taxa de aplicação hidráulica	Elaborar estudos dedicados à verificação experimental da eficiência de molhamento com diferentes materiais utilizados como meio suporte e diferentes áreas superficiais específicas, variando a taxa de aplicação hidráulica para determinar combinações ideais entre tais variáveis

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.13 Quanto à aeração natural e arraste de ar

##### 4.7.13.1 S (pontos fortes)

###### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projeto civil simplificado e que não demanda de projeto eletromecânico e de automação por ser aeração natural;
- As condições mínimas para que a aeração natural ocorra estão relacionadas às verificações de dimensionamento, de detalhes e características de projeto simplificadas;
- Projeto deve assegurar aberturas mínimas recomendadas em literatura e em normas referentes à laje perfurada e às aberturas laterais no perímetro mais inferior do filtro, visando promover o fluxo interno de ar e troca de ar entre a parte interna e externa;
- A utilização de meio suporte com materiais que oferecem maior índice de vazios aumenta a capacidade de aeração natural do filtro e permite aumentar a altura útil do meio suporte sem prejudicar o desenvolvimento de biomassa aeróbia.

###### Para a etapa de implantação:

- Soluções que promovem a aeração natural são de simples execução ou instalação e não encarecem a obra.

###### Para a etapa de operação e manutenção:

- A aeração natural elimina a necessidade de aeração forçada para promover a atividade biológica aeróbia e o tratamento aeróbio, dispensando a operação, o controle e a manutenção de equipamentos eletromecânicos e agregando vantagens quanto à eficiência energética à ETE.

#### 4.7.13.2 W (pontos fracos)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- A parede dupla construída externamente ao filtro percolador pode dificultar o fluxo de ar e a troca de ar entre os meios interno e externo.

##### Para a etapa de implantação:

- Fiscalização da obra deve assegurar que sejam executadas as aberturas mínimas recomendadas e projetadas (por parecerem detalhes irrelevantes sob o aspecto de obra civil, a execução das aberturas laterais e o atendimento à especificação de projeto quanto aos furos da laje de drenagem podem não ser objeto de fiscalização rigorosa, prejudicando o funcionamento do filtro quando colocado em operação).

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- A operação tem dificuldade em controlar a conservação e a funcionalidade dos furos na laje de drenagem, pois não há acesso visual direto ou acesso para inspeção ou manutenção e desobstrução dos furos;
- A literatura sugere que quando a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo ao filtro, ou seja, a diferença entre a temperatura do esgoto e do ar externo, foi de zero a  $\pm 2^\circ \text{C}$ , o fluxo de ar é reduzido e a troca de ar fica comprometida, reduzindo a eficiência do filtro.

#### 4.7.13.3 O (oportunidades)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Desenvolver estudo de monitoramento de fluxo do ar e disponibilidade de oxigênio no interior de filtros percoladores para verificar se a parede dupla é um fator de interferência da aeração natural;

- Desenvolver estudo de monitoramento de fluxo do ar e disponibilidade de oxigênio no interior de filtros percoladores em função de variações de temperatura para verificar se o sentido do fluxo de ar interfere significativamente na eficiência do tratamento;
- Confrontar dados de temperatura média local e temperatura média do esgoto afluente, verificar se a diferença entre as temperaturas é inferior a  $\pm 2^\circ \text{C}$  e avaliar se esse fator influencia e compromete a eficiência esperada para o filtro percolador.

#### 4.7.13.4 T (ameaças)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Verificar a viabilidade de funcionamento do filtro percolador caso o local em estudo tenha como característica a baixa diferença entre as temperaturas do ar e do esgoto afluente, de zero a  $\pm 2^\circ \text{C}$ , como uma situação predominante ao longo do dia.

Para a etapa de implantação:

- Empreiteiro ou fornecedor pode entregar materiais inadequados, meio suporte que não cumpra a função de drenagem ou que acelere o processo de colmatção, bem como pode não executar os furos na laje de drenagem de forma correta.

Para a etapa de operação e manutenção:

- A literatura sugere que quando a diferença de temperatura entre o ambiente interno e externo ao filtro, ou seja, a diferença entre a temperatura do esgoto e do ar externo, foi de zero a  $\pm 2^\circ \text{C}$ , o fluxo de ar é reduzido e a troca de ar fica comprometida, reduzindo a eficiência do filtro.

#### 4.7.13.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

Os pontos fracos relacionados na análise são referentes à parede dupla e à fiscalização da obra quanto à execução das aberturas mínimas na laje perfurada e no perímetro mais inferior do filtro percolador.

Quanto à parede dupla, foi apontado como uma oportunidade desenvolver estudos de monitoramento do fluxo de ar e de disponibilidade de oxigênio no interior do filtro para verificar se a parede dupla influencia negativamente tais fatores, fundamentais para promover o tratamento aeróbio no filtro.

Foi apontada como oportunidade a revisão dos projetos e a retirada da parede dupla sempre que possível. Deve-se atentar a todas as outras recomendações verificadas em literatura e em norma para dimensionamento e projeto de filtros percoladores. Ainda, podem ser utilizados materiais com maior índice de vazios como meio suporte, visando o favorecimento do fluxo de ar interno.

Quanto à fiscalização da obra, ações rigorosas nessa etapa, bem como a convocação dos projetistas para conferências eventuais em obra são fundamentais para garantir a aeração natural do filtro. As ações rigorosas nessa etapa, com profissionais de projeto e de obra atuando em conjunto, também minimizam ou eliminam ameaças relacionadas à qualidade dos materiais utilizados como meio suporte, que podem refletir em processos de colmatação, prejudicando também o fluxo de ar dentro do filtro.

Os aspectos para promover a aeração natural e o arraste de ar dentro do filtro evidenciam mais uma vez as características simplificadas de funcionamento do filtro percolador, dependendo predominantemente de o projeto prever tais fatores e a implantação e operação aplicarem as especificações e recomendações de projeto.

O Quadro 27 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à aeração natural e ao arraste de ar nos filtros percoladores.

Quadro 27 – Ações e desdobramentos relacionados à aeração natural e arraste de ar

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Eliminar paredes duplas nos projetos futuros	Projetar filtros percoladores com a cota de fundo próxima à cota do terreno quando possível
Atender às recomendações mínimas de norma e de literatura	Projetar filtros percoladores atendendo as recomendações de norma e de literatura para garantir o fluxo e a troca de ar interno e externo
Verificar em obra o cumprimento das recomendações e especificações de projeto	Fiscalizar em obra a correta execução das recomendações e especificações de projeto visando garantir o arraste de ar e a aeração natural no filtro
Estudar o fluxo de ar e a disponibilidade de oxigênio no interior dos filtros	Desenvolver estudo para verificar a influência que a parede dupla e que as temperaturas interna e externa ao filtro provocam no fluxo de ar e na disponibilidade de oxigênio no interior do filtro

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.14 Quanto à recirculação do efluente

##### 4.7.14.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- O dimensionamento de filtros percoladores com recirculação permite melhorar a eficiência do tratamento em termos de remoção de matéria orgânica;
- O dimensionamento de filtros percoladores com recirculação permite melhorar a eficiência do tratamento para atingir níveis de nitrificação parcial e total;
- A recirculação do efluente do filtro possibilita suprir períodos de baixa vazão, equalizando a vazão afluente ao filtro em função da vazão afluente à ETE, mantendo a alimentação do filtro constante e uniforme.

##### Para a etapa de implantação:

- O valor de implantação de uma estrutura necessária para recirculação não é onerosa se comparado ao valor total de uma obra de uma ETE e aos benefícios para o funcionamento do filtro e para o tratamento do esgoto.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- A recirculação do efluente do filtro é uma das formas para controlar o crescimento excessivo da biomassa aderida;
- A recirculação do efluente do filtro controla a emissão de odores;



- A recirculação do efluente do filtro controla o crescimento de vetores, moscas e caramujos;
- A recirculação do efluente do filtro possibilita a manutenção da vazão constante e da alimentação constante ao filtro, compensando a variação da vazão afluenta à ETE.

#### 4.7.14.2 W (pontos fracos)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Requer maior volume útil dos filtros percoladores para adequar a capacidade hidráulica do filtro à vazão de recirculação;
- Requer recuperação de nível e sistema de recalque para promover a recirculação;
- Poucos projetos da Sanepar preveem estrutura para recirculação do efluente tratado.

##### Para a etapa de implantação:

- Requer implantação de elevatória de recuperação de nível e sistema de recalque para recirculação (porém a estrutura não deve ser onerosa se comparada à obra da ETE).

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- Requer operação e manutenção da elevatória de recuperação de nível e do sistema de recalque para recirculação;
- Aumenta o consumo de energia da ETE;
- Não é realizada na maioria das ETES visitadas do Paraná;
- Necessidade de planejamento e definição de rotina de operação e de manutenção preventiva.

#### 4.7.14.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Adequar projetos prevendo diferentes possibilidades de manobras operacionais para recirculação do efluente do filtro.

#### 4.7.14.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Caso em projeto não tenha sido prevista a instalação de equipamentos ou soluções para manter a elevatória de recirculação operando em casos de queda de energia, a taxa de aplicação hidráulica e a alimentação do filtro ficam prejudicadas, refletindo na eficiência do tratamento.

#### 4.7.14.5 Análise cruzada da Matriz SWOT e indicação de ações para melhorias

A recirculação do efluente do filtro percolador tem vários efeitos apontados como pontos fortes. Entre eles a possibilidade de dimensionar filtros para alta remoção de DBO e DQO e para nitrificação, no mesmo filtro.

Independentemente do objetivo de tratamento estabelecido, a manutenção da vazão de alimentação constante em períodos de menor vazão afluente da ETE é fundamental para garantir a alimentação constante, uniforme e homogênea da biomassa, refletindo na eficiência do filtro.

O controle do crescimento excessivo da biomassa e controle do crescimento de vetores, moscas e caramujos também é fundamental para o desenvolvimento adequado do biofilme.

Todos os pontos fortes e vantagens operacionais e de eficiência do tratamento minimizam os itens elencados como pontos fracos, desde a necessidade de elaboração de projeto, implantação e operação de estação elevatória para recirculação até o maior custo de implantação do filtro em função do maior volume necessário e do incremento de consumo de energia para realização do recalque.

O fato de a recirculação não ser realizada na maioria dos filtros percoladores do Paraná é uma ameaça ao bom funcionamento do filtro, mas é também uma

oportunidade de melhoria nas ETEs existentes e nos novos projetos, sendo que os pontos fortes podem ser utilizados para minimizar as ameaças e potencializar as oportunidades.

O Quadro 28 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à recirculação do efluente nos filtros percoladores.

Quadro 28 – Ações e desdobramentos relacionados à recirculação do efluente

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Dimensionar filtros percoladores prevendo a recirculação do efluente no filtro	Dimensionar o filtro percolador com capacidade hidráulica para praticar a recirculação do efluente do filtro ou do decantador secundário no próprio filtro, principalmente quando se objetiva melhoria da qualidade do efluente final em termos de remoção de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal, bem como para manter a taxa de aplicação hidráulica constante, para controlar o crescimento do biofilme, para evitar maus odores e para evitar a proliferação de moscas, vetores e caramujos
Compatibilizar a vazão afluyente à ETE com a vazão a ser recirculada	Operar a elevatória de recuperação de nível de forma a combinar a vazão afluyente à ETE e a vazão de recirculação para que a soma dos volumes seja sempre constante, mantendo a taxa de aplicação hidráulica e a alimentação da biomassa sempre constantes
Adaptar o fluxograma de ETEs em operação que não possuem recirculação	Verificar o dimensionamento da ETE e os objetivos de tratamento e projetar adequações para implantação e operação de elevatória de recuperação de nível para promover a recirculação do efluente no filtro

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.15 Quanto à nitrificação

##### 4.7.15.1 S (pontos fortes)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Parâmetros de projeto, taxas de operação e recirculação permitem o dimensionamento de filtros percoladores objetivando à nitrificação;
- Realização de nitrificação apenas com aeração natural, sem equipamentos eletromecânicos que consomem energia para aeração forçada;
- Projetos de filtros percoladores são competitivos com outros processos unitários aeróbios que demandam energia para alimentar sistemas de aeração forçada quando o objetivo é a remoção de matéria orgânica combinada à realização de nitrificação;

- Projetos podem ser flexíveis e adaptáveis prevendo variações de vazão, taxas de aplicação hidráulica, cargas orgânicas volumétricas, altura útil do meio suporte, entre outras, ao longo dos anos ou para etapas futuras, visando à manutenção da qualidade do efluente final quando do incremento populacional ou aumento da vazão e cargas afluentes ou quando da necessidade de atingir parâmetros mais restritivos definidos em metas progressivas.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Operação e manutenção com custos reduzidos se comparados a processos de lodos ativados quando o objetivo é a remoção de matéria orgânica combinada à realização de nitrificação;
- Controle operacional simplificado se comparado a processos de lodos ativados.

4.7.15.2      *W* (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Requer grandes volumes de filtro e de meio suporte para promover a nitrificação.

Para a etapa de implantação:

- Implantação com maiores custos se comparado a processos de lodos ativados;
- Demanda grandes áreas e volumes implantados para realizar nitrificação e desnitrificação.

4.7.15.3      *O* (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Elaborar projetos de filtros percoladores competitivos com os demais processos unitários aeróbios que promovem a nitrificação;
- Elaborar projetos de filtros percoladores terciários, específicos para promover nitrificação.

#### 4.7.15.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Variações de concentração do esgoto afluente à ETE podem comprometer o atingimento dos objetivos de tratamento quanto à nitrificação.

#### 4.7.15.5 Análise cruzada da Matriz SWOT e indicação de ações para melhorias

Quanto aos pontos fracos apontados para filtros percoladores quanto à nitrificação, os maiores volumes e áreas requeridos para um filtro capaz de realizar a nitrificação não serão problema se houver área disponível para implantação.

Se comparado o maior custo de implantação com o custo de energia e de operação de outro sistema aeróbio capaz de realizar a nitrificação, o filtro percolador apresenta vantagens de custo, com resultados favoráveis apontados em estudos específicos compostos por análise de *Capex* e *Opex*.

Os pontos fortes elencados acabam, portanto, tendo maior relevância, minimizando os pontos fracos apontados. Tais pontos fortes podem ser concentrados para elaborar projetos de filtros percoladores competitivos se comparados a outros processos, aproveitando essa oportunidade de apresentar projetos de processos aeróbios eficientes e que utilizam menos energia na operação.

O Quadro 29 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados à nitrificação em filtros percoladores.

Quadro 29 – Ações e desdobramentos relacionados à nitrificação

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Considerar estudos de viabilidade para escolha dos processos a serem implantados	Verificar a viabilidade do emprego de filtros percoladores, comparando este processo unitário com outros processos biológicos aeróbios
Dimensionar filtros percoladores conforme o objetivo de tratamento	Utilizar equações de dimensionamento modernas e parâmetros de projeto e taxas de operação conforme recomenda a literatura ou conforme adaptações de coeficientes, obtidas a partir de estudos dedicados
Dimensionar filtros percoladores visando incremento de capacidade e realização de nitrificação em etapa futura	Dimensionar filtros para remoção de matéria orgânica preparados para incremento de capacidade ou ampliação da ETE visando à realização de nitrificação em etapa futura
Reduzir o volume total necessário para nitrificação	Utilizar meio suporte plástico para reduzir volumes necessários, desde que consideradas as ponderações realizadas para o meio suporte plástico e a partir de estudo de viabilidade que apresente viabilidade para tal

Quadro 29 – Ações e desdobramentos relacionados à nitrificação (continuação)

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Adequar ETEs existentes para atingir nitrificação	Estudar caso a caso as adaptações necessárias, incluindo implantação de novas unidades ou prevendo aumento da altura útil do filtro percolador
Estudar o uso combinado de filtros percoladores em alta e baixa taxa	Verificar a viabilidade do uso combinado de filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico dimensionados para o abatimento de carga orgânica seguidos de filtros percoladores em baixa taxa com pedra brita dimensionados para promover a nitrificação, aproveitando assim as melhores características dos dois materiais
Realizar estudos comparativos com base em experiências adquirida	Utilizar as experiências de projeto, obra, operação e manutenção em escala operacional para validar e revisar os conceitos aplicados

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.16 Quanto ao sistema de controle de picos de vazão afluente ao filtro percolador

##### 4.7.16.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- O projeto deve prever sistema de controle de vazão excedente e de contenção de picos de vazão, visando à manutenção da taxa de aplicação hidráulica e visando à proteção do biofilme contra taxas hidráulicas superiores às definidas em projeto;
- A solução de projeto deve prever comportas de nível na caixa divisora de fluxo à montante dos filtros percoladores de forma que a vazão excedente não seja encaminhada aos filtros;
- Pode-se verificar a possibilidade de adotar uma configuração em que a vazão excedente seja encaminhada para um tanque de contenção ou reservatório de acúmulo para que seja possível retornar a vazão armazenada ao processo de tratamento nos períodos de vazão afluente inferior à capacidade dos módulos de tratamento.

##### Para a etapa de implantação:

- As adaptações ou as novas estruturas necessárias para proteger os filtros de vazões excedentes e, conforme o caso, para armazenar volumes excedentes por um período de tempo são soluções simplificadas, não onerando de forma significativa o orçamento de uma obra de implantação de uma ETE.



Para a etapa de operação e manutenção:

- A operação e a manutenção de caixas divisoras de fluxo com comportas para extravasamento de vazão excedente incluem atividades simplificadas e podem ser projetadas com abertura e fechamento por controle de nível;
- A operação e a manutenção de tanques de contenção ou reservatórios de acúmulo de vazão excedente incluem atividades simplificadas e podem ser projetadas com abertura e fechamento por controle de nível.

4.7.16.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projetos utilizam tubulação para extravasor apenas desviando a vazão excedente do sistema de distribuição, porém lançando a vazão na superfície do próprio filtro, prejudicando o biofilme e a eficiência do tratamento.

Para a etapa de implantação:

- A implantação de tanques de contenção para grandes vazões pode representar investimento significativo de obra, principalmente quando se trata de ETE já existente, podendo ser um fator a ser ponderado caso a caso.

4.7.16.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Demanda de automatização do controle de vazão excedente para que não seja necessária a presença de um operador 24 h para abrir ou fechar o sistema de extravasamento e de contenção.

#### 4.7.16.4 T (ameaças)

Para a etapa de operação e manutenção:

- Não realizar controle da vazão excedente e lançar diretamente no filtro prejudica o biofilme e a eficiência do processo de tratamento.

#### 4.7.16.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

A análise das ETEs no Paraná identificou um ponto fraco quanto ao projeto da tubulação de extravasamento e do fato de não haver possibilidade de manobra operacional para desviar a vazão excedente, se não lança-la no próprio filtro, sendo esse fato apontando não apenas como um ponto fraco do projeto e da operação, mas também como uma ameaça ao bom funcionamento do filtro.

Para reverter tal fato, os pontos fortes descritos incluem definições de projeto visando o controle da vazão excedente de outra forma tal que não prejudique a biomassa e a eficiência do filtro.

O Quadro 30 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados ao sistema de controle de picos de vazão afluente aos filtros percoladores.

Quadro 30 – Ações e desdobramentos relacionados ao sistema de controle de picos de vazão

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Projetar sistema de extravasamento da vazão excedente afluente ao filtro percolador	Projetar caixa divisora de fluxo com controle da vazão máxima a ser encaminhada aos filtros percoladores por nível ou por sensores, conforme o porte e o nível de instrumentação da ETE, e com tubulação independente para extravasamento ou armazenamento temporário em tanque de contenção ou de acúmulo
Adequar ETEs em operação à solução proposta de sistema de extravasor	Elaborar estudo e projeto e executar obras de adequação para eliminar ponto de extravasamento dentro do filtro percolador nas ETEs em operação e verificar a necessidade de intervenção no meio suporte

FONTE: O Autor (2017).

#### 4.7.17 Quanto a odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador

##### 4.7.17.1 S (pontos fortes)

##### Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projetos devem prever uma unidade para captura, coleta e tratamento de odores e de gases corrosivos a montante do filtro percolador;
- Pequena aeração ou cascadeamento em caixa a montante do filtro é suficiente para provocar o desprendimento de odor e de gases corrosivos;
- Tratamento de odores e gases corrosivos pode ser realizado com filtração biológica, sem adição de produtos químicos.

##### Para a etapa de implantação:

- Implantação de sistema de captura, coleta e tratamento de odores e gases corrosivos não é oneroso à obra, seja de implantação ou de adaptação, reforma ou ampliação da ETE;
- Sistema de captura, coleta e tratamento de odores e gases corrosivos pode ser feito em uma ETE em operação, com adaptações simplificadas e de baixo custo de implantação.

##### Para a etapa de operação e manutenção:

- A operação e a manutenção de um filtro biológico para tratamento de gases odoríferos e corrosivos é composta por atividades simplificadas e de periodicidade tal que se encaixa em modelos de operação fixa ou volante.

#### 4.7.17.2 W (pontos fracos)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- Projetos não preveem uma unidade para captura, coleta e tratamento de odores e de gases corrosivos a montante do filtro percolador, gerando dificuldades e problemas operacionais, principalmente no sistema de distribuição, podendo comprometer o funcionamento e a eficiência do filtro.

Para a etapa de operação e manutenção:

- Filtro biológico para tratamento de odores e gases corrosivos demanda manutenção periódica do meio filtrante;
- Filtro biológico para tratamento de odores e gases corrosivos demanda manutenção da umidade ótima do meio filtrante.

#### 4.7.17.3 O (oportunidades)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto, temos:

- Estudar possibilidade de encaminhar gases capturados para as camadas mais profundas do filtro percolador, utilizando a biomassa que trata o esgoto para tratar também a fase gasosa, verificando se há possível ganho de aeração no filtro e possíveis efeitos negativos no biofilme e na eficiência do filtro, inclusive de corrosão da estrutura de concreto na parte mais inferior do filtro.

#### 4.7.17.4 T (ameaças)

Para a etapa de concepção, dimensionamento e projeto:

- O projeto de captura e transporte de gases deve ser elaborado considerando riscos quanto à explosão, uma vez que os gases provenientes do tratamento anaeróbio apresentam tal risco.

#### 4.7.17.5 Análise cruzada da Matriz *SWOT* e indicação de ações para melhorias

A necessidade de implantar sistemas de captura e tratamento de gases corrosivos e odores em uma etapa entre o tratamento anaeróbio e o filtro percolador é evidente e influencia o bom funcionamento do sistema de distribuição e, consequentemente, a eficiência do filtro percolador.

Atualmente este é um ponto fraco verificado em etapa de concepção, pois os projetos não contemplam uma unidade para retirada dos gases corrosivos e odores, sendo os efeitos negativos verificados na operação, como a corrosão do sistema de distribuição e a dificuldade de rotação do sistema, bem como efeitos negativos relacionados a maus odores, sentidos inclusive pela população vizinha à ETE.

Para tal, os pontos fortes relacionados incluem soluções simples que devem ser consideradas em etapa de projeto, mas que também podem ser adaptadas em ETEs que já estão em operação, minimizando ou até mesmo eliminando os pontos fracos elencados.

A necessidade de operação e manutenção de uma unidade adicional de tratamento de gases foi um ponto fraco apontado como consequência da instalação de um sistema de tratamento da fase gasosa. Os pontos fortes e os benefícios de realizar a captação e o tratamento de odores e gases corrosivos, entretanto, compensam a operação dessa unidade.

Uma oportunidade de estudo apontada foi verificar a possibilidade de envio dos gases capturados para o próprio filtro percolador, fazendo com que os gases sejam introduzidos no fundo do filtro, contra o fluxo do afluente. O estudo deve ser realizado no intuito de confirmar se os gases introduzidos seriam prejudiciais ao tratamento da fase líquida e se a biomassa teria capacidade para tratar tais gases odoríferos e corrosivos. Ainda, por serem corrosivos quando em contato com o ar, seria preciso verificar se ocorre esse efeito no interior do filtro.

O Quadro 31 aponta as principais ações e os desdobramentos relacionados a odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador.

Quadro 31 – Ações e desdobramentos relacionados a odores e gases corrosivos

<b>Ação</b>	<b>Desdobramentos</b>
Contemplar sistemas para minimização de odores e corrosão nos projetos para novas ETEs ou para ampliação e melhorias de ETEs em operação	Projetar soluções para enclausuramento dos pontos de emissão de odores e gases corrosivos e para implantação de unidade de captura e tratamento de odores e gases corrosivos a montante do filtro percolador, tanto para novas ETEs quanto para ampliações e melhorias de ETEs em operação
Projetar adaptações de sistemas para minimização de odores e corrosão para adequar ETEs em operação	Considerar projeto e implantação de unidade de captura e tratamento de gases corrosivos e odores a montante do filtro percolador para ETEs em operação
Priorizar o uso de tecnologias e soluções econômicas e sustentáveis	Priorizar sempre que possível as soluções com tratamento biológico e que não demandem insumos químicos para o tratamento de odores e gases corrosivos

FONTE: O Autor (2017).



## 5 CONCLUSÕES

### 5.1 Avaliação comparativa de dimensionamento de filtros percoladores utilizando diferentes equações e diferentes materiais como meio suporte

O levantamento das equações de dimensionamento e o estudo do método internacional DWA (2016) para dimensionamento de filtros percoladores possibilitou esclarecer as diferenças entre as equações elaboradas desde 1948, citadas em literatura, incluindo o método de cálculo internacional proposto pela DWA (2016).

Para as simulações de dimensionamento realizadas no presente estudo, foram aplicadas as diferentes equações, variando o meio suporte utilizado, permitindo verificar o comportamento de cada equação ao atribuir variações de taxa de aplicação hidráulica, carga orgânica volumétrica, altura do meio suporte, recirculação, entre outras variáveis, sendo possível analisar a dinâmica das equações, além da variação dos resultados conforme as alterações de parâmetros de projeto e de operação.

A partir das simulações realizadas, foi possível perceber as diferenças entre os métodos, as equações e as variáveis apresentadas e comparar os resultados de volumes totais e eficiências obtidas, de tal forma a apontar as equações que melhor representam a dinâmica de funcionamento de um filtro percolador e indicar aquelas que não apresentaram resultados coerentes com o comportamento esperado em um filtro percolador ao variar os parâmetros nas seções de simulações.

O estudo sugere que sejam utilizadas principalmente as equações de Velz modificada e de Gujer & Bollinger conforme sugerido pelo método DWA (2016) por entender que tais equações e sequências de cálculo empregadas representaram matematicamente a dinâmica de funcionamento de um filtro percolador e por verificar que estas são as que consideram o maior número de variáveis significativas para o dimensionamento de um filtro percolador.

O presente estudo ressalta a importância de realizar verificações e validações a partir da comparação dos resultados de ETEs com filtros percoladores em escala operacional que representem as características locais com os resultados de dimensionamento obtidos a partir das equações propostas pela DWA (2016). Para realizar um estudo com esse objetivo, podem ser realizados ajustes de taxas, coeficientes ou constantes, estabelecendo fatores de correção empíricos para que dados reais analisados em ETEs em operação estejam contidos nas curvas que

representam graficamente as equações trabalhadas, agregando verificação empírica das equações estudadas, adequando o dimensionamento às características locais ou regionais, adaptando taxas, coeficientes ou constantes de dimensionamento à realidade nacional e às peculiaridades atribuídas a sistemas com reatores anaeróbios.

Ressalta-se ainda que as equações normalmente consideram o sistema filtro percolador e decantador secundário e que os resultados obtidos em termos de concentração de carga orgânica e nitrogênio amoniacal não se referem, portanto, ao efluente do filtro, mas sim ao efluente do decantador secundário. Considerando que no filtro percolador predominam processos biológicos e reações bioquímicas e que no decantador secundário ocorrem apenas processos físicos, de separação de sólidos da fase líquida, entende-se que os dois processos unitários são regidos por lógicas distintas e poderiam ser dimensionados separadamente, sendo esta também uma oportunidade de estudo dedicado, com o objetivo de definir ajustes a partir das equações apresentadas, bem como métodos de dimensionamento que considerem separadamente os dois processos de tratamento.

As possibilidades de estudo supracitadas vão ao encontro do que sugere Metcalf & Eddy (2016), que afirma que há muitos fatores de interferência relacionados ao funcionamento de um filtro percolador e que o dimensionamento desse processo biológico deve ser empírico.

O presente estudo sugere, portanto, que estudos complementares, dedicados exclusivamente ao dimensionamento de filtros percoladores devem ser desenvolvidos, visando à prática de dimensionamentos que estimem de forma mais aproximada a dinâmica de funcionamento de um filtro percolador.

## 5.2 Apresentação de contextos, aspectos locais e experiências de operação verificadas no Paraná e no Sul da Alemanha e análise crítica dos principais aspectos para o bom funcionamento de um filtro percolador

A oportunidade de analisar estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores em dois países de realidades distintas, sendo um em desenvolvimento e outro desenvolvido e referência no setor de saneamento, enriquece o estudo e amplia as visões em relação aos processos e às variáveis que influenciam tais processos analisados.

Ao observar cada aspecto discutido durante as visitas realizadas nas ETEs do Paraná e da Alemanha, em ambos cenários foi possível apontar práticas positivas e negativas, dificuldades, problemas, soluções e experiências de sucesso. Assim, o presente estudo considerou que apenas definir como objetivo a comparação de diferentes realidades e a importação de soluções de sucesso verificadas na Alemanha para implantação no Paraná poderia resultar em ações não viáveis ou não aplicáveis, justamente em função das diferentes realidades. A partir dessa perspectiva, o presente estudo considerou a soma das experiências como a forma mais apropriada para abordar, interpretar, assimilar e discutir todos os aspectos estudados e observados.

Os conceitos verificados em literatura foram somados às experiências repassadas pelas equipes de operação das ETEs visitadas no Brasil e na Alemanha e às soluções e práticas observadas durante as visitas realizadas, possibilitando a análise crítica de cada aspecto abordado nos diferentes locais e cenários.

A análise crítica das características e peculiaridades locais e dos fatores que influenciam direta ou indiretamente as etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de sistemas de esgotamento sanitário no Brasil e na Alemanha também foi realizada.

Ao visualizar uma possibilidade de implantar qualquer solução no Brasil a partir de um modelo em operação verificado na Alemanha, o presente estudo considerou que é necessário ponderar todas as variáveis que podem influenciar o modelo e verificar possíveis adaptações necessárias, bem como estudar a real viabilidade de aplicação e obtenção de sucesso a partir de simulações, testes e experimentos.

O detalhamento das experiências, as discussões elaboradas e as ponderações levantadas foram esclarecedoras, pertinentes e aplicáveis e, de forma objetiva, podem subsidiar ações para melhorias nas etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de filtros percoladores.

### 5.3 Sistematização das informações, resultados e discussões obtidos para subsidiar ações para melhorias em ETEs com filtros percoladores

A sistematização das informações, dos resultados e das discussões foi realizada com a utilização da ferramenta de gestão e planejamento Matriz *SWOT*, apontando pontos fortes, pontos fracos, oportunidades e ameaças para cada aspecto e etapa discutido, apresentando um resumo sintetizado das experiências obtidas ao longo do estudo em mais de 300 tópicos objetivos e sintetizados enquadrados na Matriz *SWOT*.

A análise cruzada da Matriz *SWOT* permitiu ainda indicar como os pontos fortes identificados podem minimizar ou suprimir os pontos fracos, ou serem direcionados ao aproveitamento de oportunidades ou à proteção contra ameaças; como os pontos fracos podem ser minimizados para que oportunidades não sejam perdidas; identificando, por fim, quando há uma situação mais vulnerável ou descoberta, representada pela combinação entre um ponto fraco interno e uma ameaça externa.

A análise dos resultados, experiências e discussões resumidos e compilados sistematicamente na Matriz *SWOT* permite a fácil assimilação e aplicação para subsidiar, planejar e executar ações para melhorias em ETEs com filtros percoladores.

A aplicação dos resultados e das discussões pode ser realizada de forma pontual, para um aspecto isolado discutido e apresentado na Matriz *SWOT*, ou pode ser planejada de forma a integrar ações complementares, conforme as análises cruzadas da Matriz *SWOT*.

O que se define nas etapas de concepção, dimensionamento e projeto reflete nas etapas de implantação, operação e manutenção. Os tópicos que subsidiam ações para melhorias visam à concepção e elaboração de projetos mais precisos e assertivos, obras mais econômicas e com materiais e equipamentos de qualidade e adequados às demandas propostas, bem como à operação e à manutenção padronizadas e eficientes, reduzindo ou até mesmo eliminando dificuldades e problemas atualmente enfrentados.

O estudo indica ainda que para todas as ações a serem realizadas, deve-se realizar ciclos de *PDCA – Plan, Do, Check, Act – or ajust* (planeje, faça, confira, atue – ou ajuste) para verificação da efetividade e para melhoria contínua. As ações para melhorias possibilitam a elaboração de estudos relacionados às novas experiências

obtidas, ampliando o cenário para novas pesquisas e novas práticas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção. O método de gestão *PDCA* pode ser utilizado não apenas para cada nova ação elaborada e implementada, mas também para o próprio processo de identificação de pontos fortes, pontos fracos, oportunidades de melhorias, oportunidades de desenvolvimento e ameaças. Estima-se que à medida que as dificuldades mais básicas são sanadas, outras oportunidades de melhoria serão os novos desafios a serem estudados e trabalhados, visando um ciclo de desenvolvimento contínuo.

#### 5.4 Atendimento ao objetivo geral proposto

Todos os conhecimentos obtidos a partir de informações de literatura e de experiências de campo em escala operacional foram integradas, discutidas e utilizadas de forma a propor melhorias para estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores.

As discussões contemplaram os aspectos teóricos e práticos fundamentais que influenciam direta ou indiretamente o bom funcionamento de filtros percoladores, relacionados às etapas de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção de estações de tratamento de esgoto compostas por filtros percoladores.

As análises contemplaram as variações quanto aos métodos de dimensionamento e quanto aos materiais utilizados como meio suporte, bem como consideraram as diferentes experiências observadas em estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores analisadas e visitadas no Brasil e na Alemanha, enriquecendo o estudo ao somar experiências nacionais e internacionais.

A soma dos resultados e das discussões teóricas com a abordagem das experiências em escala operacional observadas no Brasil e na Alemanha permitiu sugerir em quais situações e como aplicar os conceitos teóricos e as boas práticas observadas, buscando a assertividade das ações, respeitando as diferenças entre os aspectos locais analisados, somando as experiências verificadas em duas realidades distintas, sendo a Alemanha um país de indiscutível relevância quanto à pesquisa, inovação e infraestrutura nos temas saneamento e esgotamento sanitário.

## 5.5 Sugestões para estudos futuros

O desenvolvimento desse trabalho permitiu a identificação de diversos temas que podem ser estudados de forma mais detalhada e aprofundada, sendo assim apresentadas algumas sugestões para estudos e trabalhos futuros.

### Sugestão (i):

Elaboração de projeto e implantação de ETE com filtros percoladores com meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado em escala reduzida utilizando diferentes materiais como meio suporte, a ser viabilizado em parceria com Universidades, companhias de saneamento, empresas prestadoras de serviço ou fornecedoras de equipamentos e grupos científicos como o Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia “INCT ETEs Sustentáveis”, visando à realização de pesquisas e testes operacionais relacionados aos principais aspectos discutidos, incluindo taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica; desenvolvimento do biofilme em função da rugosidade do meio suporte e em função das taxas e cargas aplicadas; prática de lavagem ou *flushing*; controle do crescimento do biofilme e eficiência de molhamento; realização de nitrificação, incluindo variação da altura do meio suporte e variação da razão de recirculação do efluente, entre outros.

### Sugestão (ii):

Definição e análise dos principais aspectos que devem ser observados para subsidiar a escolha entre filtros percoladores ou lodos ativados ou a utilização combinada dos dois processos como pós tratamento de reatores anaeróbios, resultando em um método a ser aplicado para desenvolver estudos de viabilidade técnica, financeira, operacional e ambiental para concepção de projetos, conforme as características do afluente e a eficiência desejada para o tratamento, em função do porte da ETE.



Sugestão (iii):

Monitoramento e análise de um sistema combinado com filtros percoladores em alta taxa com meio suporte plástico estruturado de fluxo cruzado seguidos de filtros percoladores de baixa taxa com meio suporte em pedra brita, tendo como principais objetivos o ganho de eficiência do tratamento em termos de degradação de matéria orgânica e de realização de nitrificação, além da prevenção da colmatação e da redução do volume total necessário, sendo uma combinação que aproveita as melhores características dos dois materiais empregados como meio suporte.

Sugestão (iv):

Validação empírica do método DWA (2016) para as ETEs do Paraná, desenvolvendo verificações e validações de equações, taxas, coeficientes e constantes adotadas a partir da comparação dos resultados de filtros percoladores em escala operacional que representem as características locais, com os resultados de dimensionamento obtidos a partir das equações propostas pela DWA (2016), de forma que os dados reais analisados em ETEs em operação estejam contidos nas curvas que representam graficamente as equações trabalhadas.

Sugestão (v):

Adaptação de equações e proposição de método de dimensionamento que considere a realização dos cálculos para estimativa de eficiência do filtro percolador e do decantador secundário como dois processos distintos, apontando equações para estimar as características do efluente do filtro percolador e equações para estimar as características do efluente do decantador secundário, considerando que os dois processos unitários são regidos por lógicas de funcionamento distintas, sendo o tratamento no filtro percolador realizado predominantemente por reações biológicas e no decantador por reações de separação física.

Sugestão (vi):

Validação de faixa de valores de taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica adequados para filtros percoladores com meio suporte plástico estruturado objetivando a nitrificação, considerando que a literatura não apresenta sugestão de valores para essa condição de operação.

Sugestão (vii):

Análise da possibilidade de compor o meio suporte de um mesmo filtro com materiais de diferentes áreas superficiais específicas (plástico estruturado e pedra brita), sendo a camada superior em plástico estruturado e a camada inferior em pedra brita, objetivando a degradação da matéria orgânica e a nitrificação.

Sugestão (viii):

Análise da possibilidade de utilização de filtro percolador como primeiro processo unitário após o sistema preliminar, sem decantação primária ou reator anaeróbio a montante, e medidas necessárias de melhoria no sistema preliminar para garantir boas condições de funcionamento ao filtro.

Sugestão (ix):

Análise da possibilidade de utilização de filtro percolador sem decantação secundária a jusante, e medidas necessárias para garantir a qualidade do efluente final quanto à presença de sólidos sedimentáveis.

Sugestão (x):

Verificação da possibilidade de realizar o tratamento dos gases corrosivos e odoríferos provenientes do tratamento anaeróbio na biomassa formada no meio suporte dos próprios filtros percoladores, captando os gases à montante do filtro percolador e encaminhando para tratamento biológico no filtro percolador, com distribuição no fundo para estabelecer fluxo ascendente, observando a resistência à

corrosão que as estruturas e os demais componentes do filtro percolador deverão apresentar e observando possíveis alterações das reações bioquímicas de degradação de matéria orgânica e de nitrificação.

#### Sugestão (xi):

Verificação de conceitos, detalhamentos de projeto e práticas de operação e manutenção de caixas de areia aeradas e validação das experiências internacionais a partir da implantação de modelos em escala reduzida em condições locais para promover a retenção simultânea de areia e gorduras visando à proteção dos demais processos a jusante dos filtros percoladores.

### 5.6 Considerações finais

Os dados apresentados referentes às estatísticas de saneamento e esgotamento sanitário no Brasil explicitam a necessidade de implantação de novos sistemas, bem como ampliação e melhorias dos sistemas e das estações de tratamento de esgoto existentes, visando à universalização dos serviços prestados à sociedade e à melhoria da qualidade do efluente tratado.

Ainda, as estatísticas apresentadas referentes aos dois países em que esse estudo buscou experiências práticas indicam, de um lado a Alemanha, com elevado índice de atendimento à coleta de esgoto e elevadas eficiências dos processos de tratamento de esgoto, e, de outro lado o Brasil, com ampla necessidade de investimentos para atendimento da população e para melhorias de sistemas que já estão em operação, reforçando o fato de que a Alemanha é referência em saneamento e esgotamento sanitário e que as experiências teóricas e práticas observadas podem ser relevantes para o desenvolvimento do setor no Brasil, desde que ponderadas e respeitadas as características e peculiaridades de cada caso estudado.

Tanto para novas estações de tratamento de esgoto quanto para a demanda de implantação de processos unitários aeróbios como pós tratamento de reatores anaeróbios em ETEs existentes, os filtros percoladores representam uma alternativa que oferece altas eficiências para a remoção de carbono e para a nitrificação, com baixo consumo de energia e sem a utilização de produtos químicos, agregando

características sustentáveis e de eficiência energética a uma estação de tratamento de esgoto.

A busca por idealizar e operar ETEs mais sustentáveis inclui o emprego de processos eficientes e simplificados, que funcionem preferencialmente a partir de processos naturais ou biológicos e que apresentem baixo consumo de energia e de produtos químicos, que ofereçam bons resultados e reduzidos impactos quanto ao tratamento do esgoto e quanto aos subprodutos gerados a partir dos processos de tratamento. As características supracitadas que agregam sustentabilidade a uma estação de tratamento de esgoto vão ao encontro do que é oferecido pelos filtros percoladores.

Os itens abordados nesse estudo são relevantes para as etapas de concepção, projeto de engenharia, implantação, operação e manutenção de estações de tratamento de esgoto com filtros percoladores, permeando os principais aspectos para o bom funcionamento de ETEs com filtros percoladores, sendo, portanto, aplicáveis às demandas de implantação de novas ETEs ou às melhorias e ampliações em ETEs existentes.

Considerando a parcela da população que ainda não é atendida por sistemas de esgotamento sanitário e considerando as ETEs que possuem tratamento apenas através de reatores anaeróbios e as ETEs que possuem filtros percoladores, há amplas oportunidades para aplicar o que foi desenvolvido no presente estudo, seja para tomada de decisão referente a novas estações de tratamento de esgoto ou a ampliações e melhorias em ETEs que já estão em operação, abrangendo aspectos de concepção, dimensionamento, projeto, implantação, operação e manutenção, agregando características de sustentabilidade às estações de tratamento, sendo aplicáveis a companhias de saneamento ou outras organizações, instituições e empresas que projetam, implantam, administram e operam estações de tratamento de esgoto.

O conteúdo teórico somado às experiências em escala operacional observadas no Brasil e na Alemanha foram fundamentais para enriquecer o estudo e compor, portanto, uma abordagem aplicável visando à preservação dos recursos hídricos, do meio ambiente natural e urbano e da saúde pública a partir da promoção do saneamento com a utilização de soluções e práticas que agregam características de sustentabilidade aos processos de tratamento de esgoto.

## REFERÊNCIAS

ABWV. Abwasserverordnung – AbwV. **Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer** (Portaria sobre os requisitos para a descarga de águas residuais nos corpos d'água - regulamento das águas residuais - Tratamento de águas residuais). 139 p. 1997.

ALMEIDA, P. G. S; OLIVEIRA, S. C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Operação de filtros biológicos percoladores pós-reatores UASB sem a etapa de decantação secundária**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v.16 n.3, jul/set 2011, p. 271-280. 2011.

ALMEIDA, P. G. S, 2007 **Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, com ênfase na nitrificação**. Dissertação. Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Belo horizonte, 113p.

ALMEIDA, P. G. S.; OLIVEIRA, S. C.; CHERNICHARO, C. A. L. **Operação de filtros biológicos percoladores pós reatores UASB sem a etapa de decantação secundária**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.16 n.3, 271-280. 2011.

ATV-A 281. **Bemessung von Tropfkörpern und Rotationstauchkörpern**. Arbeitsblatt, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall . 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12.209: **Elaboração de projetos hidráulico-sanitários de estações de tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8160: **Sistemas prediais de esgoto sanitário - Projeto e execução**. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 248: **Agregados - Determinação da Composição**. Rio de Janeiro, 2003.

BAHLO, K.; WACH, G. **Naturnahe Abwasserreinigung**. 137 p. Freiburg: Ökobuch, 1996.

BRASIL. LEI Nº 11.445, DE 5 DE JANEIRO DE 2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**, Brasília, DF, Jan 2007. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/l11445.htm)>. Acesso em: 19 de jan. 2017.

BRASIL. RESOLUÇÃO Nº 430, DE 13 DE MAIO DE 2011. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**, Brasília, DF, Mai 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>. Acesso em: 19 de jan. 2017.

CHERNICHARO, C. A. L. **Reatores anaeróbios**. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. 379 p. 2ª edição. Belo Horizonte. Editora UFMG. 2016.

CHERNICHARO, C. A. L. (coordenador). **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. PROSAB/FINEP, 1ª ed. Rio de Janeiro: Segrac. 544 p. 2001.

CHERNICHARO, C. A. L. **Post-treatment options for the anaerobic treatment of domestic wastewater**. Reviews in environmental science and biotechnology, v.5, n.1, p. 73-92, 2006.

CHIAVENATO, Idalberto; SAPIRO, Arão. **Planejamento Estratégico: fundamentos e aplicações**. 1. ed. 13ª tiragem. Rio de Janeiro: Elsevier, 2003.

DWA, Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. **Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen** (Dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto em climas quentes e frios). p.84-108, p.260-274. Out. 2016.

DWA, Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. **Ergänzende Berechnungsbeispiele zum DWA-Themenband T4/2016 "Bemessung von Kläranlagen in warmen und kalten Klimazonen"** (Exemplos adicionais de cálculo para o Volume temático - Dimensionamento de Estações de Tratamento de Esgoto em climas quentes e frios). 91p. 2017.

DWA, Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. **Leistungsvergleich kommunaler Kläranlagen** (Comparação de desempenho de estações municipais de tratamento de esgoto). 6 p. Hennef. 2016.



DWA, Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. **Statistisches Bundesamt und DWA-Arbeitsgruppe KEK-1.2 / „Statistik“ KAKorrespondenz Abwasser, Abfall.** 62 p. · Nr. 1 / KAKorrespondenz Abwasser, Abfall · 2014 (61) · Nr. 12. 2015.

DWA, Deutsch Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall. **Abwasser und Klärschlamm in Deutschland statistische Betrachtungen** (Estatísticas e considerações sobre tratamento de esgoto e lodo de esgoto na Alemanha). 16 p. 61 Nr. 12, 2014. 62 Nr. 1, 2015.

FINE, Laurence G. **The SWOT Analysis.** Kick It. LLC, USA - Amazon Kindle Edition. 2011.

ENVIROPRO, SEWACO. Hycover static distributor. Disponível em: <https://www.enviopro.co.uk/entry/36862/Sewaco/HYCOVER-static-distributor/#>. Acesso em 27/03/2017.

ESTEVES, Francisco de Assis. **Fundamentos de limnologia.** 2 ed. Rio de Janeiro. 1998.

GLUMRB. **Recommended Standards For Wastewater Facilities (Ten State Standards),** Great Lakes-Upper Mississippi River Board of State Sanitary Engineering Health Education Services Inc. Albany, NY. 1997.

GRADY, C. P. L.; DAIGGER, G. T.; LIM, H.C.. **Biological wastewater treatment.** 2a. Edição. Nova Iorque. 1999.

GOMES, André. **Eficiência energética em tratamento de efluentes, renascimento da tecnologia de filtros percoladores.** Encontro técnico AESabesp – 25º Congresso Nacional de Saneamento e Meio Ambiente, São Paulo. 2014.

GOMIERO, Fernando Zilli; SEVILHA, Vitor Alécio; MIOTTO, José Luiz; LAUTENSCHLAGER, Sandro Rogério; OKAWA, Cristhiane Michiko Passos. **Eficiência de tratamento de esgoto com filtros biológicos percoladores com suporte de polipropileno (bio-dek) em comparação com suporte pedra brita.** III Simpósio sobre sistemas sustentáveis. Porto Alegre. 2016.

GUJER, W.; BOLLER, M. **Design of a nitrifying trickling filter based upon theoretical concepts**. Water Research, 1986.

HARRISSON, R.J.; DAIGGER, G.T. **A comparison of trickling filter media**. Journal of Water Pollution Control Federation. v.59, nº7, 679-685, 1987.

HENRICH, C.; MAEGGRAFF, M.. **Energy-efficient Wastewater Reuse – The renaissance of Trickling Filter Technology**. 12 p.. 2013.

HENRICH, C.; SEEGER, M.; STEINMETZ, H. **Schlussbericht zum BMBF-geforderten Verbundprojekt Exportorientierte Forschung und Entwicklung auf dem Gebiet abwasser (EXPOVAL)**, Universitat Stuttgart und Enxio Water echnologies. 2016.

IAWQ. **Activated sludge model**. International Association on Water Quality. [s.l]: IAWQ Scientific and Technical Reports, [s.v], n.2, 1995

ISAKA, K.; DATE, Y.; SUMINO, T.; YOSHIE, S.; TSUNEDA, S. **Growth characteristic of anaerobic ammonium-oxidizing bacteria in an anaerobic biological filtrated reactor**. Biotechnological Products and Process Engineering, v.70, p.47-52, 2006.

JORDÃO, Eduardo Pacheco; PESSÔA, Constantino Arruda. **Tratamento de esgotos domésticos**. 7 ed. Rio de Janeiro: ABES, 2014.

JUNQUEIRA, Cristina H.Z. **Proposta do modelo de planejamento estratégico para serviços profissionais – um estudo de caso em serviços odontológicos**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

KELVION, Kelvion Holding GmbH. **Comparativo de Capex e Opex (20 anos) entre sistema de lodos ativados e filtro biológico percolador como tratamento secundário para atendimento a corpo receptor Classe 2**. Apresentação disponibilizada em 03/07/2017.

KEMPTEN. Abwasserverband Kempten. **Technische Daten**. Disponível em: <https://www.avke.de/technische-daten.html> . Acesso em: 02/02/2017.

KOTLER, Philip; ARMSTRONG, Gary. **Princípios de Marketing**. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1993.

METCALF & EDDY, Inc. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5th. ed. Porto Alegre. 1980 p. 2016.

MEDEIROS, Mônica. **Pós Tratamento de efluente de lagoa facultativa fotossintética em filtros biológicos percoladores visando a remoção de nitrogênio amoniacal**. 132p. São Paulo. 2011.

MOTA, Francisco Suetônio Bastos; VON SPERLING, Marcos. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**. 428 p.. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, ABES, 2009.

MÜLLER, Cláudio J. **Modelo de gestão integrando planejamento estratégico, sistemas de avaliação de desempenho e gerenciamento de processos (MEIO – Modelo de Estratégia, Indicadores e Operações)**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

NRC, National Research Council. **Sewage Treatment at Military Installations**. Sewage Works Journal. 1946.

NUNES, José Alves. **Tratamento biológico de águas residuárias**. 3ª edição. 277 p. Aracaju. 2012.

OMS, Organização Mundial da Saúde, **“Pollution an Health”**, Genebra, 1986.

PARANÁ. Resolução nº 021/09 da Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Hídricos-SEMA. **Dispõe sobre licenciamento ambiental, estabelece condições e padrões ambientais e dá outras providências, para empreendimentos de saneamento**. Curitiba, PR, Abril 2009. Disponível em: [http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao\\_ambiental/Legislacao\\_estadual/RE\\_SOLUCOES/RESOLUCAO\\_SEMA\\_21\\_2009\\_LICENCIAMENITO\\_PADROES\\_AMBENTAIS\\_SANEAMENTO.pdf](http://www.iap.pr.gov.br/arquivos/File/Legislacao_ambiental/Legislacao_estadual/RE_SOLUCOES/RESOLUCAO_SEMA_21_2009_LICENCIAMENITO_PADROES_AMBENTAIS_SANEAMENTO.pdf). Acesso em: 19/01/2017.

PARKER, D.S.; MERRIL, D.T. **Effect of plastic media configuration on trickling filter performance.** Journal of Water Pollution Control Federation. v.56, p. 955-961, 1984.

PARKER, D.S.; RICHARDS, T. **Nitrification in trickling filters.** Journal WPCF, v. 58, nº9, p 896-901, 1986.

SCHROEDER, E. D., e G. Tchobanoglous. **Mass Transfer Limitations in Trickling Filter Designs.** J. WPCF. 1976.

SCHULZE, K. L.. **Load and Efficiency in trickling Filters.** J. WPCF. 1960.

SEBRAE (Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas). **Ferramenta: análise SWOT (clássico).** 3 p.. Disponível em <http://www.sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/artigos/6-ferramentas-para-o-planejamento-estrategico-da-sua-empresa,281479e90d205510VgnVCM1000004c00210aRCRD#>. Acesso em 20/10/2017.

SILVA, G. M. **Estudo de viabilidade de pós tratamento de efluentes de UASB através de filtros biológicos percoladores sem etapa de clarificação.** 2005. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

SILVA C.; ROSA, M. J. **Energy performance indicators of wastewater treatment - a field study with 17 Portuguese plants.** Water Science and Technology 72(4) 510519. doi: 10.2166/wst.2015.189. 2015.

SNIS (SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO). **Diagnósticos dos serviços de água e esgoto 2015.** Brasília. 2017. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2015>. Acesso em: 07/07/2017.

SISWEB (SISTEMA DE INFORMAÇÕES SANEPAR). **Sistema de Informações Ambientais.** Acesso entre 2016 e 2017 (diversos acessos para consulta de dados).

SISWEB (SISTEMA DE INFORMAÇÕES SANEPAR). **Sistema de Qualidade da Água**. Acesso entre 2016 e 2017 (diversos acessos para consulta de dados).

SOBRINHO, P. A.; JORDÃO, E. P. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios – uma análise crítica.. 2015. [file:///C:/Users/USER/Downloads/9\\_POS-TRATAMENTO\\_DE\\_EFLUENTES\\_DE\\_REATORES\\_ANAEROBI.pdf](file:///C:/Users/USER/Downloads/9_POS-TRATAMENTO_DE_EFLUENTES_DE_REATORES_ANAEROBI.pdf). Acesso em: 03/04/2017.

STROUS, M.; van GERVEN, E.; KUENEN, G.; JETTEN, M. **Effects of Aerobic and Microaerobic Conditions on Anaerobic Ammonium-Oxidizing (Anammox) Sludge**. Applied and Environmental Microbiology, v.63, p.2446-2448, 1997a.

STROUS, M.; van GERVEN, E.; KUENEN, M. S. M. **Ammonium removal from concentrated waste streams with the anaerobic ammonium oxidation (Anammox) process in different reactor configurations**. Water Research, v.31, p.1955-1962, 1997b.

STROUS, M.; Heijnen, J. J.; Kuenen, J. G.; Jetten, M. S. M. **The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms**. Applied Microbiology Biotechnology, v.50, p.589-596, 1998.

STROUS, M.; Fuerst, J. A.; Kramer, E. H. M.; Logemann, S.; Muyzer G.; van de Pas-Schoonen, K. T.; Webb, R.; Kuene, J.; Jetten, M. S. M. **Missing litotroph identified as new planctomycete**. Nature, v.400, p.446-449, 1999b.

STROUS, M.; Kuenen, J. G.; Jetten, M. S. M. **Key physiology of anaerobic ammonium oxidation**. Applied and Environmental Microbiology, v.65, p.3248-3250, 1999a.

STUTTGARTER-NACHRICHTEN. **Extreme Preisunterschiede zwischen Städten**. Disponível em: <https://www.stuttgarter-nachrichten.de/inhalt.studie-zu-den-abwassergebuehren-riesige-unterschiede-bei-abwassergebuehren.c79f4576-1311-4eec-88db-67463883fa9a.html> . Acesso em: 03/07/2017

TILLEY *et al.*,. **Compendium of Sanitation Systems and Technologies**. 2nd. Revised Edition. 178 p. Dübendorf. Switzerland. 2014.

TUNDISI, J. G. E TUNDISI, T. M.. **Limnologia**. 631p. São Paulo: Oficina de textos. 2008.

VAN HAANDEL, A. C.; MARAIS, G. O. **Comportamento do sistema de lodo ativado**. Epgraf. Campina Grande, PB. 1999.

VELZ, C. J.. **A Basic Law for the Performance of Biological Beds**. Sewage Works J.. 1948.

VON SPERLING, Marcos; CHERNICHARO, Carlos Augusto de Lemos. **Biological wastewater treatment in warm climate regions**. 1st. Ed. IWA UFMG London (2005).

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2 ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 1996.

WEF - Water Environment Federation. **"Design of Municipal Wastewater Treatment Plant - WEF Manual of Practice Nº8**. Washington, EUA (1992).

WEF - Water Environment Federation. **Aerobic Fixed-Growth Reactors**. (2000).

WEF - Water Environment Federation. **"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, EUA (1999).

ZHANG, L.; Zheng, P.; TANG, C.; Jin, R. **Anaerobic ammonium oxidation for treatment of ammonium-rich wastewaters**. Journal of Zhejiang University Science B, v.9, p.416-426, 2008.

ZHU, G; Peng, Y.; LI, B.; GUO, J.; YANG, Q.; WANG, S. **Biological removal of nitrogen from wastewater**. Reviews Environmental Contamination & Toxicology, v.192, p.159-195, 2008.



## APÊNDICES

**APÊNDICE A – ÍNDICE PRÁTICO PARA BUSCA RÁPIDA DOS ASPECTOS  
DISCUTIDOS REFERENTES AOS FILTROS PERCOLADORES**

## **ÍNDICE PRÁTICO PARA BUSCA RÁPIDA DOS ASPECTOS DISCUTIDOS REFERENTES AOS FILTROS PERCOLADORES**

O “Índice Prático” foi criado para facilitar a leitura desta dissertação quando se deseja verificar o que foi apresentado sobre um aspecto específico, dentre todos os aspectos abordados que influenciam o bom funcionamento de um filtro percolador.

Para cada aspecto abordado na revisão de literatura, há um ou mais itens que apresentam resultados, discussões, considerações e análise cruzada da Matriz *SWOT*. O Índice Prático indica e agrupa, portanto, dessa forma, por aspecto abordado na Revisão de Literatura e nos Resultados e Discussões, indicando o tema principal, o aspecto discutido e os itens relacionados, apresentados nos capítulos 2 e 4, respectivamente.

Deve-se atentar que o Índice Prático não aborda todos os itens que compõem a dissertação, mas sim principalmente os subitens de ordem quaternária dos itens 2.5 PROCESSOS UNITÁRIOS QUE COMPÕEM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTO COM FILTROS PERCOLADORES e 4.4 DESCRITIVO DAS ETES COM FILTROS PERCOLADORES ANALISADAS NO PARANÁ E NA ALEMANHA e os subitens de ordem terciária do item 4.7 ANÁLISE *SWOT* E INDICAÇÃO DE AÇÕES PARA MELHORIAS, facilitando a visualização do que foi tratado na revisão de literatura e nos resultados e discussões para cada aspecto abordado.

## ÍNDICE PRÁTICO PARA BUSCA RÁPIDA DOS ASPECTOS DISCUTIDOS REFERENTES AOS FILTROS PERCOLADORES

**Legenda:**

	Tema principal
	Aspecto discutido
LIT	Revisão de literatura
R/D	Resultados e discussões
SWOT	Análise Matriz SWOT

### CARACTERIZAÇÃO DO AFLUENTE E LEGISLAÇÕES NO BRASIL E NA ALEMANHA

Aspecto discutido:		CARACTERÍSTICA DO AFLUENTE E PADRÃO DE QUALIDADE DO EFLUENTE FINAL	Página
2.2.1	LIT	Composição do esgoto doméstico	29
2.3.1	LIT	Exigências legais quanto à qualidade do efluente tratado no Brasil e no Paraná	38
2.3.2	LIT	Exigências legais quanto à qualidade do efluente final na Alemanha	40
4.6.1	R/D	Diferentes características do esgoto afluente	253
4.6.3	R/D	Qualidade do efluente final, eficiências obtidas e a relação com as exigências legais e ambientais	254
4.6.4	R/D	Estrutura organizacional de empresas prestadoras de serviço de coleta e tratamento de esgoto no Paraná e na Alemanha	255

### PROCESSOS UNITÁRIOS A MONTANTE DO FILTRO PERCOLADOR

Aspecto discutido:		RETENÇÃO DE SÓLIDOS GROSSEIROS	Página
2.5.1.1	LIT	Processos e equipamentos para retenção de sólidos grosseiros	43
4.4.1.1	R/D	Retenção de sólidos grosseiros	171
4.7.2	SWOT	Quanto à retenção de sólidos grosseiros	266

Aspecto discutido:		RETENÇÃO DE AREIA E GORDURA	Página
2.5.1.2	LIT	Processos e equipamentos para retenção de areia e gordura	44
4.4.1.2	R/D	Retenção de areia e gordura	178
4.7.3	SWOT	Quanto à retenção de areia e gordura	271

Aspecto discutido:		DECANTADORES PRIMÁRIOS	Página
2.5.1.3	LIT	Decantadores primários	46
4.4.1.3	R/D	Decantadores primários	180

Aspecto discutido:		REATORES ANAERÓBIOS	Página
2.5.1.4	LIT	Reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta do lodo	47
4.4.1.4	R/D	Reatores anaeróbios	181
4.4.2.23	R/D	Odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador	238
4.7.17	SWOT	Quanto a odores e gases corrosivos provenientes do tratamento anaeróbio a montante do filtro percolador	328

## FILTROS PERCOLADORES

Aspecto discutido:		DIMENSIONAMENTO DE FILTROS PERCOLADORES	Página
2.5.2.1	LIT	Histórico das equações de dimensionamento de filtros percoladores	53
2.5.2.2	LIT	Sequência de equações sugerida por Metcalf & Eddy (2016)	55
4.1.1.1	R/D	Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf & Eddy para o cenário "C"	137
4.1.2.1	R/D	Resultados obtidos a partir das equações citadas por Metcalf & Eddy para o cenário "CN"	152
2.5.2.3	LIT	Sequência de equações sugerida por Jordão e Pessoa (2014)	61
4.1.1.2	R/D	Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário "C"	141
4.1.2.2	R/D	Resultados obtidos a partir da sequência de equações citadas por Jordão e Pessoa para o cenário "CN"	155
2.5.2.4	LIT	Sequência de equações do método internacional proposta pela DWA (2016)	65
4.1.1.3	R/D	Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário "C"	145
4.1.2.3	R/D	Resultados obtidos a partir das equações propostas pela DWA para o cenário "CN"	159
2.5.2.5	LIT	Compilação das equações de dimensionamento de filtros percoladores	71
4.1.1.4	R/D	Comparação entre as equações referentes à remoção de matéria orgânica e discussões	149
4.1.2.4	R/D	Comparação entre as equações referentes à nitrificação e discussões	164
4.7.4	SWOT	Quanto aos métodos de dimensionamento de filtros percoladores	276
2.5.2.7	LIT	Critérios e parâmetros de dimensionamento sugeridos na literatura	77
2.5.2.8	LIT	Recomendações nacionais normatizadas	79

Aspecto discutido:		TAXA DE APLICAÇÃO HIDRÁULICA E CARGA ORGÂNICA VOLUMÉTRICA	Página
2.5.2.6	LIT	Taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica	75
4.4.2.12	R/D	Taxas de aplicação hidráulica e cargas orgânicas volumétricas	217
4.4.2.13	R/D	Necessidade de verificação de faixa de valores para taxa de aplicação hidráulica e carga orgânica volumétrica para filtros com meio suporte plástico	219
4.4.2.22	R/D	Sistema de controle de picos de vazão afluyente ao filtro percolador	236
4.7.8	SWOT	Quanto à taxa de aplicação hidráulica e à carga orgânica volumétrica	296
4.7.16	SWOT	Quanto ao sistema de controle de picos de vazão afluyente ao filtro percolador	325

Aspecto discutido:		MATERIAIS UTILIZADOS COMO MEIO SUPORTE	Página
2.5.2.9	LIT	Materiais utilizados como meio suporte	80
4.4.2.1	R/D	Materiais utilizados como meio suporte	185
4.4.2.2	R/D	Dificuldades de obra quanto ao fornecimento de pedra brita adequada	190
4.4.2.3	R/D	Custo real para aquisição e instalação de meio suporte em pedra brita e em plástico estruturado de fluxo cruzado a partir de uma experiência de obra	191

4.4.2.4	R/D	Fatores adicionais que devem ser considerados para comparar o custo de implantação de um filtro com pedra brita ou com plástico estruturado	193
4.4.2.5	R/D	Problemas com o meio suporte e os reflexos na operação	196
4.7.5	SWOT	Quanto ao meio suporte em pedra brita	279
4.7.6	SWOT	Quanto ao meio suporte em plástico estruturado de fluxo cruzado	285

Aspecto discutido:		<b>SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DA VAZÃO AFLUENTE AO FILTRO</b>	<b>Página</b>
2.5.2.10	LIT	Sistema de distribuição da vazão afluyente ao filtro percolador	85
4.4.2.6	R/D	Sistema de distribuição da vazão afluyente ao filtro percolador	197
4.4.2.7	R/D	A influência de materiais sólidos no sistema de distribuição da vazão afluyente e a importância da manutenção preventiva	203
4.4.2.8	R/D	Uniformidade da distribuição da vazão afluyente	205
4.4.2.9	R/D	Manutenção da velocidade de rotação do sistema de distribuição	209
4.4.2.10	R/D	Consequências da distribuição não uniforme	212
4.4.2.11	R/D	Outras variações de sistema de distribuição da vazão afluyente	215
4.7.7	SWOT	Quanto ao sistema de distribuição de vazão afluyente ao filtro	292

Aspecto discutido:		<b>DESENVOLVIMENTO, CRESCIMENTO E CONTROLE DO BIOFILME</b>	<b>Página</b>
2.5.2.11	LIT	Crecimento e controle do biofilme	86
4.4.2.14	R/D	Crecimento e controle do biofilme	221
4.7.9	SWOT	Quanto ao desenvolvimento do biofilme	299

Aspecto discutido:		<b>LAVAGEM DO MEIO SUPORTE E CONTROLE DO BIOFILME</b>	<b>Página</b>
2.5.2.12	LIT	Lavagem do meio suporte ( <i>Spülkraft ou flushing</i> )	86
4.4.2.15	R/D	Lavagem do meio suporte	223
4.7.10	SWOT	Quanto à lavagem do meio suporte e controle do crecimento do biofilme	304

Aspecto discutido:		<b>COLMATAÇÃO E SUBSTITUIÇÃO DO MEIO SUPORTE</b>	<b>Página</b>
2.5.2.13	LIT	Colmatação e substituição do meio suporte	89
4.4.2.16	R/D	Colmatação e substituição do meio suporte	224
4.7.11	SWOT	Quanto à colmatação e substituição do meio suporte	307

Aspecto discutido:		<b>EFICIÊNCIA DE MOLHAMENTO DO MEIO SUPORTE</b>	<b>Página</b>
2.5.2.14	LIT	Eficiência de molhamento do meio suporte	90
4.4.2.17	R/D	Eficiência de molhamento do meio suporte	227
4.7.12	SWOT	Quanto à eficiência de molhamento do meio suporte	311

Aspecto discutido:		<b>AERAÇÃO E ARRASTE DE AR NO INTERIOR DO FILTRO</b>	<b>Página</b>
2.5.2.15	LIT	Aeração natural e arraste de ar no interior do filtro percolador	91
4.4.2.18	R/D	Aeração natural e arraste de ar no interior do filtro percolador	228
4.7.13	SWOT	Quanto à aeração natural e arraste de ar	315

Aspecto discutido:		<b>RECIRCULAÇÃO DE EFLUENTE E DE LODO</b>	<b>Página</b>
2.5.2.16	LIT	Recirculação do efluente dos filtros percoladores	93
4.4.2.19	R/D	Recirculação do efluente dos filtros percoladores	232
4.4.2.20	R/D	Recirculação de lodo	234



4.7.14	SWOT	Quanto à recirculação do efluente	319
--------	------	-----------------------------------	-----

Aspecto discutido:		NITRIFICAÇÃO E DESNITRIFICAÇÃO EM FILTROS PERCOLADORES	Página
2.5.2.17	LIT	Nitrificação e desnitrificação em filtros percoladores	96
4.4.2.21	R/D	Nitrificação e desnitrificação em filtros percoladores	234
4.7.15	SWOT	Quanto à nitrificação	322

Aspecto discutido:		CRESCIMENTO DE MOSCAS, INSETOS, VETORES E CARAMUJOS	Página
2.5.2.18	LIT	Crescimento de moscas, insetos, vetores e caramujos	99
4.4.2.24	R/D	Crescimento de moscas, insetos, vetores e caramujos	241

#### PROCESSOS UNITÁRIOS A JUSANTE DO FILTRO PERCOLADOR

Aspecto discutido:		DECANTADORES SECUNDÁRIOS	Página
2.5.3.1	LIT	Decantadores secundários	100
2.5.3.2	LIT	Filtros percoladores sem etapa de decantação secundária	101

#### COMPARAÇÕES E COMBINAÇÕES ENTRE PROCESSOS UNITÁRIOS

Aspecto discutido:		COMPARAÇÕES E COMBINAÇÕES ENTRE PROCESSOS UNITÁRIOS	Página
2.5.1.5	LIT	Comparação entre decantadores primários e reatores anaeróbios	49
2.5.1.6	LIT	Combinação de processos anaeróbios de alta taxa e processos aeróbios	50
4.2.1	R/D	Processos unitários empregados nas ETEs no Paraná e considerações sobre a aplicabilidade do estudo para a Sanepar	167
4.4.3.1	R/D	ETEs analisadas e visitadas no Paraná	242
ApêndiceB	R/D	Quadro resumo com as principais características das ETEs com filtros percoladores analisadas no Paraná	357
2.5.3.3	LIT	Filtros percoladores e lodos ativados combinados	102
2.5.4.1	LIT	Parâmetros comparativos entre processos aeróbios com biomassa aderida e em suspensão (filtros biológicos e lodos ativados)	105
2.5.4.2	LIT	Eficiência energética	107
2.5.4.3	LIT	Comparativo de Capex e Opex para sistemas com filtros percoladores e com lodos ativados	108
4.4.3.2	R/D	ETEs analisadas e visitadas no Sul da Alemanha	244
4.5.1.1	R/D	ETE <i>Kempton</i>	244
4.5.1.2	R/D	ETE <i>Böblingen-Sindelfingen</i>	248
4.5.1.3	R/D	ETE <i>Neuhausen</i>	250
4.6.2	R/D	Processos unitários e tecnologias de tratamento de esgoto utilizadas	253
4.7.1	SWOT	Quanto à escolha de filtros percoladores para compor os processos de uma estação de tratamento de esgoto	259

**APÊNDICE B – QUADRO RESUMO COM AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS  
DAS ETES COM FILTROS PERCOLADORES ANALISADAS NO PARANÁ**

Project Information		Financial Performance (USD)										Operational Metrics										Compliance & Risk									
		Revenue					Profit					Costs					Production					Quality					Safety				
ID	Name	Q1	Q2	Q3	Q4	YTD	Q1	Q2	Q3	Q4	YTD	Q1	Q2	Q3	Q4	YTD	Units	Cost/Unit	Efficiency	Defects	Rejection	Incidents	Fatalities	Lost Time							
001	Project Alpha	120000	150000	180000	200000	650000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2%	0.5%	1	0	120							
002	Project Beta	90000	110000	130000	160000	590000	25000	35000	45000	55000	160000	8000	10000	12000	15000	40000	800	1200	80%	3%	0.8%	2	1	150							
003	Project Gamma	110000	140000	170000	190000	610000	28000	38000	48000	58000	172000	9000	11000	14000	17000	41000	900	1400	82%	2.5%	0.6%	1	0	110							
004	Project Delta	130000	160000	190000	210000	690000	35000	45000	55000	65000	200000	12000	15000	18000	22000	57000	1100	1600	88%	1.5%	0.4%	0	0	90							
005	Project Epsilon	80000	100000	120000	140000	540000	20000	30000	40000	50000	140000	7000	9000	11000	13000	39000	700	1100	78%	4%	1.0%	3	2	180							
006	Project Zeta	100000	130000	160000	180000	570000	22000	32000	42000	52000	156000	8500	11500	14500	17500	42500	850	1350	81%	3.5%	0.7%	2	1	140							
007	Project Eta	140000	170000	200000	220000	730000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
008	Project Theta	95000	125000	155000	175000	650000	27000	37000	47000	57000	168000	9500	12500	15500	18500	44500	950	1450	83%	2.8%	0.5%	1	0	100							
009	Project Iota	115000	145000	175000	195000	635000	32000	42000	52000	62000	188000	10500	13500	16500	19500	49500	1050	1550	86%	2.2%	0.4%	0	0	95							
010	Project Kappa	125000	155000	185000	205000	670000	33000	43000	53000	63000	192000	11000	14000	17000	21000	55000	1150	1650	89%	1.8%	0.3%	0	0	85							
011	Project Lambda	85000	115000	145000	165000	595000	21000	31000	41000	51000	144000	7500	10500	13500	16500	41500	750	1150	79%	3.8%	0.9%	2	1	160							
012	Project Mu	105000	135000	165000	185000	605000	24000	34000	44000	54000	156000	8800	11800	14800	17800	42600	880	1380	80%	3.2%	0.6%	2	1	130							
013	Project Nu	135000	165000	195000	215000	710000	38000	48000	58000	68000	212000	13000	16000	19000	23000	66000	1250	1750	91%	1.1%	0.2%	0	0	75							
014	Project Xi	98000	128000	158000	178000	644000	29000	39000	49000	59000	176000	9800	12800	15800	18800	45400	980	1480	84%	2.6%	0.4%	1	0	105							
015	Project Omicron	118000	148000	178000	198000	644000	31000	41000	51000	61000	184000	10800	13800	16800	20800	52400	1080	1580	87%	2.4%	0.3%	0	0	98							
016	Project Pi	128000	158000	188000	208000	682000	34000	44000	54000	64000	196000	11500	14500	17500	21500	57500	1200	1700	90%	1.9%	0.2%	0	0	88							
017	Project Rho	88000	118000	148000	168000	594000	21500	31500	41500	51500	145500	7600	10600	13600	16600	42300	760	1160	79%	3.9%	0.9%	2	1	165							
018	Project Sigma	108000	138000	168000	188000	604000	24500	34500	44500	54500	157500	8900	11900	14900	17900	43250	890	1390	80%	3.1%	0.6%	2	1	135							
019	Project Tau	138000	168000	198000	218000	722000	39000	49000	59000	69000	216000	13500	16500	19500	23500	67500	1300	1800	92%	1.0%	0.1%	0	0	70							
020	Project Upsilon	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
021	Project Phi	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
022	Project Chi	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600	14600	17600	21600	58300	1210	1710	90%	1.7%	0.2%	0	0	89							
023	Project Psi	89000	119000	149000	169000	597000	22000	32000	42000	52000	156000	9000	12000	15000	18000	46000	900	1400	83%	2.9%	0.5%	1	0	102							
024	Project Omega	109000	139000	169000	189000	606000	25000	35000	45000	55000	165000	9200	12200	15200	18200	44600	920	1420	84%	2.5%	0.4%	1	0	108							
025	Project A	139000	169000	199000	219000	726000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
026	Project B	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
027	Project C	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
028	Project D	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600	14600	17600	21600	58300	1210	1710	90%	1.7%	0.2%	0	0	89							
029	Project E	89000	119000	149000	169000	597000	22000	32000	42000	52000	156000	9000	12000	15000	18000	46000	900	1400	83%	2.9%	0.5%	1	0	102							
030	Project F	109000	139000	169000	189000	606000	25000	35000	45000	55000	165000	9200	12200	15200	18200	44600	920	1420	84%	2.5%	0.4%	1	0	108							
031	Project G	139000	169000	199000	219000	726000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
032	Project H	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
033	Project I	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
034	Project J	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600	14600	17600	21600	58300	1210	1710	90%	1.7%	0.2%	0	0	89							
035	Project K	89000	119000	149000	169000	597000	22000	32000	42000	52000	156000	9000	12000	15000	18000	46000	900	1400	83%	2.9%	0.5%	1	0	102							
036	Project L	109000	139000	169000	189000	606000	25000	35000	45000	55000	165000	9200	12200	15200	18200	44600	920	1420	84%	2.5%	0.4%	1	0	108							
037	Project M	139000	169000	199000	219000	726000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
038	Project N	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
039	Project O	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
040	Project P	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600	14600	17600	21600	58300	1210	1710	90%	1.7%	0.2%	0	0	89							
041	Project Q	89000	119000	149000	169000	597000	22000	32000	42000	52000	156000	9000	12000	15000	18000	46000	900	1400	83%	2.9%	0.5%	1	0	102							
042	Project R	109000	139000	169000	189000	606000	25000	35000	45000	55000	165000	9200	12200	15200	18200	44600	920	1420	84%	2.5%	0.4%	1	0	108							
043	Project S	139000	169000	199000	219000	726000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
044	Project T	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
045	Project U	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
046	Project V	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600	14600	17600	21600	58300	1210	1710	90%	1.7%	0.2%	0	0	89							
047	Project W	89000	119000	149000	169000	597000	22000	32000	42000	52000	156000	9000	12000	15000	18000	46000	900	1400	83%	2.9%	0.5%	1	0	102							
048	Project X	109000	139000	169000	189000	606000	25000	35000	45000	55000	165000	9200	12200	15200	18200	44600	920	1420	84%	2.5%	0.4%	1	0	108							
049	Project Y	139000	169000	199000	219000	726000	40000	50000	60000	70000	220000	14000	17000	20000	24000	65000	1200	1700	90%	1.2%	0.3%	0	0	80							
050	Project Z	99000	129000	159000	179000	657000	30000	40000	50000	60000	180000	10000	12000	15000	18000	45000	1000	1500	85%	2.7%	0.5%	1	0	115							
051	Project A	119000	149000	179000	199000	646000	31500	41500	51500	61500	185500	10900	13900	16900	20900	52800	1090	1590	87%	2.3%	0.3%	0	0	99							
052	Project B	129000	159000	189000	209000	686000	34500	44500	54500	64500	198500	11600																			

**APÊNDICE C – MATRIZ *SWOT***

[illegible]